



**Vers une observation inter-disciplinaire des phénomènes
naturels sur les bassins versants de montagne :
Hydrogéologie à coût limite du bassin du Vorz (Massif
de Belledonne, Isère)**

Thierry Barth

► **To cite this version:**

Thierry Barth. Vers une observation inter-disciplinaire des phénomènes naturels sur les bassins versants de montagne : Hydrogéologie à coût limite du bassin du Vorz (Massif de Belledonne, Isère). Sciences de la Terre. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENA006 . tel-00764344

HAL Id: tel-00764344

<https://theses.hal.science/tel-00764344>

Submitted on 12 Dec 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Sciences de la Terre de l'Univers et de l'Environnement**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

BARTH Thierry

Thèse dirigée par **M^r DELANNOY Jean-Jacques** et
codirigée par **M^r SAULNIER Georges-Marie**

préparée au sein du **Laboratoire EDYTEM**
dans **l'École Doctorale SISEO**

Vers une Observation inter-disciplinaire des phénomènes naturels sur les bassins versants de montagne

***Hydro-météorologie à coût limité
du bassin du Vorz***

(Massif de Belledonne, Isère)

Thèse soutenue publiquement le **16 Mars 2012**,
devant le jury composé de :

M^{me} Anne JOHANNET

Chargé de Recherche à l'Ecole des Mines d'Alès (Rapporteur)

M^r Denis DARTUS

Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse (Rapporteur)

M^r Dominique DUMAS

Maître de conférence à l'Université Joseph Fourier de Grenoble (Examineur)

M^r Antonio CELSO DANTAS ANTONIO

Professeur à l'Université Fédérale de Pernambuco (Examineur)

M^r Jean-Jacques DELANNOY

Professeur à l'Université de Savoie (Directeur de Thèse)

M^r Georges-Marie SAULNIER

Chargé de Recherche à l'Université de Savoie (Co-Directeur de Thèse)



UNIVERSITES DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque

THESE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Grenoble

Spécialité : **Sciences de la Terre de l'Univers et de l'Environnement**

préparée au laboratoire **EDYTEM**

dans le cadre de l'Ecole Doctorale **SISEO**

présentée et soutenue publiquement
par

BARTH Thierry

le 16 Mars 2012

Titre :

**Vers une Observation inter-disciplinaire des phénomènes naturels
sur les bassins versants de montagne**

***Hydro-météorologie à coût limité du bassin du Vorz
(Massif de Belledonne, Isère)***

Directeur : **DELANNOY Jean-Jacques**
Co-Directeur : **SAULNIER Georges-Marie**

Jury

M. JOHANNET Anne,
M. DARTUS Denis,
M. DUMAS Dominique,
M. CELSO DANTAS ANTONIO Antonio,
M. DELANNOY Jean-Jacques,
M. SAULNIER Georges-Marie,

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Directeur de these
Co-directeur de these

Remerciements

Les remerciements, une partie que chaque doctorant rêve d'écrire un jour car elle est synonyme de libération. Au delà du symbole qu'ils représentent de baisser le rideau sur trois ans de dur labeur, ils sont surtout l'occasion de rendre hommage aux personnes qui m'ont communiqué leur enthousiasme, leur soutien, et m'ont accordé leur confiance au cours de ce travail.

Bien souvent la première page que je lisais avec attention dans les nombreux mémoires que j'ai pu consulter depuis plusieurs années, était celle des remerciements. Ils m'ont permis de rêver et d'imaginer ce que pouvait être une thèse. C'est aujourd'hui mon tour de m'atteler à ce délicat mais agréable exercice qu'est la rédaction des remerciements, en espérant que cela éveille chez un jeune étudiant l'envie et la curiosité de découvrir un jour le monde de la recherche.

En premier lieu, je tiens à remercier *M^{me}* Anne Johannet, *M^r* Denis Dartus *M^r* Dominique Dumas et *M^r* Antonio Celso Dantas Antonino, membres du jury, d'avoir accepté de participer à la lecture et l'évaluation de ce travail, malgré leurs occupations respectives.

Mes premiers remerciements vont à Jean-Jacques DELANNOY. Lorsque je suis arrivé à l'Institut de la Montagne en 2008, il a accepté de m'ouvrir les portes du laboratoire EDYTEM, ce qui m'a permis par la suite de commencer ce travail de thèse qui s'achève aujourd'hui. Je le remercie donc pour la confiance et le soutien qu'il m'a accordé, à un moment difficile où j'en avais besoin, lors de l'attribution des allocations de recherches. Il a ensuite accepté d'être mon Directeur de Recherche pendant ces 3 années. Au cours de ce travail, il a su me faire confiance et m'a laissé travailler dans les directions que je souhaitais sans m'imposer de contraintes mettant en suspend le processus de recherche. Je le remercie également pour les corrections très enrichissantes qu'il a réalisées dans ce manuscrit, et dans l'attention qu'il a portée à ce que cette thèse se déroule bien jusqu'à la soutenance.

A ce stade, je souhaite également remercier le partenaire académique de ce projet qu'est l'UNIVERSITÉ DE SAVOIE, qui a financé l'instrumentation sur le Vorz, et m'a permis d'obtenir mon allocation de recherche.

Je tiens également à remercier Georges-Marie SAULNIER pour l'encadrement dont j'ai bénéficié en sa compagnie. Lorsque je l'ai rencontré en Avril 2008, il m'a rapidement fait confiance et proposé de travailler sur ce sujet passionnant de l'hydrométéorologie de montagne, en m'aidant à obtenir la bourse ministérielle grâce à laquelle cette thèse a pu être possible. Tout au long de mes recherches, j'ai pu bénéficier de son soutien, sa présence et sa disponibilité, pour m'aider et m'orienter, notamment dans l'initiation du processus de recherche. Il a ensuite su me laisser évoluer dans un cadre de travail plus libre me permettant d'explorer mes propres pistes, de faire des erreurs, d'envisager des techniques nouvelles avec ma vision des choses, tout en m'apportant son soutien, son aide et un recadrage, lorsque cela était nécessaire. En bref, il a fait de ces 3 années un véritable apprentissage du métier de chercheur.

Je le remercie également pour nos longues discussions toujours riches en informations, pistes de recherches, perspectives ou projets (parfois même trop!!!), qui m'ont permis de construire une base de connaissances solide, de replacer ma thématique de recherche dans un cadre plus vaste et de l'envisager sous un nouveau jour.

Mes remerciements vont également à Emmanuel MALET, sans qui ce travail n'aurait pu aboutir. Véritable touche à tout et expert de l'instrumentation en milieu naturel, la réussite du fonctionnement du réseau du Vorz est essentiellement de son ressort. Toujours disponible pour m'accompagner sur le terrain, même dans les conditions les plus difficiles (neige, froid, pluie,...), son esprit d'initiative, son enthousiasme, son sens pratique et sa maîtrise des techniques de mesure, nous ont fait gagner un temps considérable, et permis de remettre en route les instruments, même dans les situations les plus désespérées (à part peut-être un bris d'éolienne, rien ne l'arrête).

Grâce à "Manu", j'ai pratiqué des choses aussi improbables que le transport d'un bateau à rames au beau milieu de la montagne, j'ai découvert et redécouvert les techniques d'assurance et de travaux sur cordes absolues indispensables pour accéder aux capteurs. Sur le terrain et au labo, nos discussions ont toujours été enrichissantes et constructives, nous menant à améliorer le réseau à chacune de nos visites.

Partir en mission avec "Manu" m'a également permis de conjuguer travail et séance d'entraînement, car c'est au pas de course que nous devons avaler le dénivelé pour récolter toutes nos données avant la nuit (qui a dit qu'il fallait toujours avoir une frontale dans son sac), ou que la neige ne soit trop mauvaise (des couloirs à 40° dans la neige fraîche en pleine chaleur, promis je ne ferai plus). Bref, "Manu", au plaisir de retravailler ensemble prochainement sur le Vorz (et le défi des 20 minutes à la cabane tiens toujours...).

L'instrumentation en montagne est un processus complexe qui ne pourrait devenir réalité sans le concours de nombreuses personnes. Un grand merci à ces personnes de l'ombre qui sont venues spontanément et avec enthousiasme, m'apporter leur aide dans les différentes phases de la mise en place de l'instrumentation sur le Vorz. Outre Georges-Marie et Emmanuel les piliers du projet, merci donc à :

- Bruno qui a partagé le bassin versant du Vorz avec moi avec ses carottages sur le Lac Blanc.
- William qui est venu à plusieurs reprises nous prêter main forte dans nos tournées exténuantes à la recherche des iButtons, qui tenaient finalement plus de la course d'orientation.
- Nicolas qui a donné de sa personne jusqu'au Col de la Mine de Fer pour l'installation des stations de mesures.
- Timothée avec qui j'ai partagé plusieurs missions sur le terrain et notamment sur les bords du Gard.
- Mélanie que j'ai embarquée sur le Vorz pour relever des capteurs dans le sol, alors qu'il venait de neiger 70 centimètres, et que les routes de France étaient bloquées par la neige en Décembre 2011. Une vraie mission terrain, mais pas forcément une idée brillante et rentable... - Ceux que j'aurais oublié de mentionner.

Une thèse ne pourrait pas se faire sans le soutien de nombreuses personnes extérieures au projet mais indispensables au fonctionnement du laboratoire en particulier :

- Carole et Charlotte qui m'ont permis de partir en colloque à l'étranger sans soucis de gestion financière.
- Vincent qui est venu à mon secours lorsque internet, mes mails ou Linux ne voulaient plus rien savoir

Je remercie également les personnes qui ont de près ou de loin contribué à faire évoluer ma vision de l'hydrométéorologie en montagne de par nos discussions ou quelques moyens que ce soit.

En premier lieu William, toujours disponible, ouvert d'esprit, et prêt à partager ses idées pour faire avancer les problèmes.

Guillaume, mon prédécesseur, qui a posé les fondations de l'utilisation de l'imagerie dans l'environnement avec le développement de son capteur HyMAGE-TIP.

J'adresse également mes remerciements à Jean-Philippe Arié, mon "mentor" du Nouveau Chapitre de la Thèse, qui m'a permis de faire le point sur mon travail de recherche et d'allumer une petite lueur au bout du tunnel qu'est la quête du poste rêvé après la Thèse.

Alain Marnézy et Laurent Astrade, qui m'ont guidé dans cette expérience enrichissante qu'est l'enseignement. Merci à eux pour leur conseils avisés et l'aide qu'ils ont pu me fournir pour rendre mes cours je l'espère plus accessibles aux étudiants.

Estelle Ployon pour les discussions que nous avons pu avoir sur la 3D, les SIG et les techniques en découlant, grâce auxquelles j'ai pu apprécier les perspectives du travail que je m'efforçais de réaliser.

Dans ce long et difficile parcours semé d'embûches qu'est la thèse, nous ne sommes heureusement jamais seul et pouvons compter sur nos "compagnons de galère". Je leur suis à tous reconnaissant d'avoir supporté mes débats enflammés et désaccords quotidiens avec mon matériel informatique, qui ont certainement troublé le calme monacal qui régnait dans repère des thésards du pôle montagne. Merci à eux de ne pas m'en avoir débarqué "manu militari"... Depuis maintenant trois ans, j'ai eu l'occasion de cotoyer un certain nombre de collègues, que je souhaite remercier pour les discussions scientifiques ou non que j'ai pu avoir en leur compagnie, le partage des coups durs, ou les séances de remotivation durant la phase de rédaction. En espérant n'oublier personne, je remercie :

■ Les anciens, auprès desquels j'ai découvert le milieu de la recherche et partagé les premiers moments de ma vie de thésard, ainsi que les premières heures dans la nouvelle "salle des doctorants" du Pôle Montagne : Souhail, Charline, Pierre, Luovic, Dominique, Bérengère partis depuis maintenant plusieurs mois vers d'autres horizons. Bonne route à eux et merci pour ces quelques mois passés en votre compagnie.

Un merci tout particulier à Pierre qui est pour beaucoup dans ma présence au laboratoire aujourd'hui, et qui m'a éclairé sur le fonctionnement d'un laboratoire de recherche, nébuleux pour le novice que j'étais. Bon courage à lui dans cet univers impitoyable qu'est le tourisme des sports d'hiver en montagne.

■ Mes compagnons de la "promotion" 2008-2011, Bruno et Melaine, à qui je souhaite bon courage pour la fin de leur rédaction et leur soutenance qui se rapproche, et bonne chance dans la suite de leurs aventures.

Un clin d'oeil également à ceux qui comme moi sont en train d'achever leur travail. Justine, Aasma, Benjamin... Il faut y croire, la délivrance est proche.

■ Les "nouveaux" qui nous ont rejoints depuis 2 ans : Jean-Philippe (mon courageux et patient voisin de bureau), Grégory, Laine, Marie, Pierre, Carole, Amandine, Leïla, Timothée, Charlotte. Je leur souhaite bon courage pour les années à venir, dans ce difficile travail de recherche qu'il est toujours plus facile de commencer que de finir.

"Special thanks to" Timothee avec qui j'ai perfectionné mes connaissances en gastronomie autrichienne et pratiqué un anglais débridé dans les endroits les plus insolites de Salzbourg (je me souviendrai longtemps de l'Abbaye...), à l'occasion de l'Ecole d'hiver "Water Scarcity". Ces quinze jours entourés de jeunes doctorants dynamiques de tous horizons, et les heures passées à refaire l'hydrologie et le monde autour d'un verre de bière locale, m'ont permis de trouver le courage, la motivation et le recul nécessaire pour achever ce travail.

■ Les moniteurs de la promotion 2011 de Grenoble : Estelle, Renaud, Christine, Clara, Alain, les collègues de l'IREGE. J'ai découvert et appris en leur compagnie ce qu'était l'enseignement, en particulier durant les retraites en séminaire à Autrans (Stage d'intégration, Doctoriales). Certains ont terminé leur thèse, d'autres s'apprêtent à le faire, bonne chance à eux pour la suite.

Une pensée particulière pour Estelle, ma coéquipière durant nos interventions au Lycée Louis Armand de

Chambéry. Faire découvrir aux lycéens le monde de la recherche et de l'Université, et tenter de leur y faire prendre goût par l'intermédiaire des risques naturels a été une expérience extrêmement enrichissante, et une vraie révélation quant à mon plaisir à partager cela avec le grand public. Peut-être des perspectives de carrières futures...

On a souvent tendance à l'oublier, mais nous ne serions rien sans les moyens matériels et informatiques mis à notre disposition. Je remercie donc :

- La salle des doctorants et mon bureau du "Pôle Montagne" qui sont devenus ma deuxième maison et en compagnie de qui j'ai passé plus d'heures (en particulier cette dernière année) qu'avec ma famille et mes proches.
- Linux, le système d'exploitation qui ne plante jamais... sauf avec moi. Grâce à lui, j'ai du apprendre à taper "`cd .\tbart\Redaction\TheseManuscrit.tex`", plutôt que de cliquer sur ma souris pour ouvrir mon fichier de rédaction. Une expérience quelque peu déconcertante au départ mais finalement enrichissante.
- LaTeX qui m'a permis de rédiger et mettre en forme le mémoire que vous vous apprêtez à lire. Si seulement la mise en page était aussi facile que cela est annoncé au départ...
- Java et Fortran. Malgré les nombreux échanges musclés que nous avons pu avoir, j'admet aujourd'hui que vos injures m'ont permis de créer des programmes stables (enfin à peu près) qui m'ont fait avancer dans mes recherches. Je ne vous en tiens pas rigueur.

Pour un passionné de montagne, nature et grands espaces, être enfermé dans un bureau peut vite devenir difficilement supportable. Merci donc au superbe cadre de travail du Bourget-du-Lac qui m'a permis de tenir jusqu'au bout. Travailler sur le bassin versant du Vorz qui m'a "hebergé" pendant 3 ans a été un véritable plaisir, et m'a permis d'assouvir simultanément mes deux passions, la recherche et la pratique de la montagne.

Un grand merci à mes victimes étudiantes, grâce à qui j'ai pu perfectionner mes techniques pédagogiques. Certaines de leurs réflexions et incompréhensions, m'ont permis de clarifier mon discours et de le rendre accessible auprès du grand public. Même si le monitorat est une activité chronophage au regard de son travail de recherche, il apporte une bouffée d'oxygène, un recul et une aptitude à partager des concepts parfois ardu, indispensables pour les doctorants que nous sommes.

Enfin, je remercie toutes les personnes que j'aurais pu oublier de mentionner ici. Puissent-elles accepter mes excuses.

Il y a une vie après la thèse (si si, il paraît), même si on a tendance à l'oublier durant les derniers mois. J'espère ainsi pouvoir recroiser un jour les personnes que je viens de remercier, que ce soit dans le cadre professionnel ou non. Ainsi, dans quelques temps, je ne serai probablement plus dans les murs du laboratoire, et même si tout n'a pas toujours été facile, cela aura été un véritable plaisir que de passer 3 ans au sein du laboratoire EDYTEM.

En tous les cas, je vous souhaite bonne route à tous.

Pour finir, je souhaite remercier mes proches pour leur soutien indéfectible tout au long de ces années. On dit souvent que la thèse est une épreuve pour le doctorant, elle l'est aussi pour les proches qui doivent supporter les périodes doutes et de difficultés, mais également les absences répétées, levés matinaux ou retours tardifs (parfois les trois...) durant les week-end et les vacances. Merci du fond du cœur à Mélanie mes parents et mon frère d'avoir su me supporter tout ce temps et de m'avoir soutenu pour me donner le courage d'aller jusqu'au bout de cette épreuve.

**Vers une observation inter-disciplinaire
des phénomènes naturels sur les bassins versants de montagne,
Hydrométéorologie à coût limité du bassin du Vorz
(Massif de Belledune, Isère)**

Résumé :

Le 22 Août 2005 une crue intense s'est produite sur le bassin versant du Vorz, détruisant partiellement le hameau de la Gorge. Cet événement a mis en évidence les difficultés à anticiper les conditions hydrométéorologiques en montagne où elles sont extrêmement variables spatialement et temporellement, et souvent faiblement instrumentées. De ce constat est né le projet de mettre en place un réseau d'instrumentation hydrométéorologique original sur le bassin versant du Vorz, afin d'y observer les phénomènes naturels et hydrologiques s'y produisant, de mieux les appréhender, et de construire les outils et méthodes nécessaires à leur modélisation.

Après deux saisons de mesures, les premiers résultats ont montré que le réseau mis en place permet d'obtenir des informations à haute résolution spatiale et temporelle sur les processus hydrométéorologiques. Malgré son installation dans le milieu difficile de la montagne (accessibilité, froid, énergie,...), une très bonne fiabilité a pu être mise en avant, ainsi que des perspectives de transposition à d'autres bassins versants, et ce, pour un faible coût financier. L'originalité du réseau est de réaliser un multi-échantillonnage de nombreux paramètres hydrométéorologiques (pluviométrie, température, neige, insolation,...), avec des résolutions spatiales (10 à 50 mètres) et temporelles (horaire à moins) permettant d'envisager une modélisation hydrologique à différentes échelles, aussi bien pour la gestion des ressources en eau (long terme) que pour la prévention des crues (court terme).

Les capteurs mis en place constituent un ensemble complémentaire et indissociable de divers instruments de mesure : iButtons (air et sol), totalisateurs, pluviomètres, appareils photographiques. La mise au point d'un capteur de mesure innovant de cartographie automatique de la couverture neigeuse (SnoDEC), à partir d'images photographiques classiques, prises à pas de temps régulier (5 à 7 images par jours) a été réalisée au cours de ce travail. Il permet de quantifier l'hétérogénéité spatiale et temporelle des phénomènes d'enneigement sur le versant, prépondérants sur son hydrologie, au vue de la persistance nivale (5 à 10 mois).

L'ensemble de ce dispositif permet de disposer d'une importante base de données, et de mettre en oeuvre différentes techniques d'interpolations des variables hydrométéorologiques sur l'ensemble du bassin versant. Ainsi, des cartographies précises du champ de température et de pluviométrie seront disponibles au pas de temps journalier. En outre, le capteur SnoDEC permettra d'analyser et quantifier l'hétérogénéité spatio-temporelle (altitude, exposition, vitesse de fonte,...) de la couverture nivale.

A partir de ces données, on pourra mieux appréhender les mécanismes hydrologiques en jeu sur le site et dessiner les contours des modélisations futures. Dans le même temps, les données disponibles pourront être combinées afin de mettre en évidence des phénomènes difficilement mesurables (limite pluie/neige, inversion thermiques,...), qui serviront à l'avenir à contraindre de manière précise les modèles nivologiques et hydrologiques.

Au travers des différents paramètres instrumentés, et grâce à l'utilisation de l'imagerie, ce réseau est capable de mesurer des variables relevant de nombreux champs disciplinaires (dynamique glaciaire, cycle végétatif,...). Il s'inscrit ainsi, par son approche interdisciplinaire, dans une volonté de mise en place d'un réseau de mesure à coût limité, destiné à l'ensemble des acteurs de l'étude et la recherche des milieux de la montagne.

Mots-clés : *Hydrométéorologie, instrumentation, modélisation, neige, montagne, imagerie*

**Towards an interdisciplinary monitoring
of natural phenomena in mountain catchments,
*Hydrometeorology at limited cost on the Vorz Catchment
(Belledonne massif, Isère, France)***

Abstract :

In August 2005, a intense flashflood occurs on the Vorz catchment affecting the village of Saint-Agnès. This event highlighted the difficulties to forecast the hydrometeorological conditions in mountain areas where they are extremely variable in space and time (*spatially and temporally*) and frequently poorly monitored. From this observation a project was funded to implement an original meteorological monitoring system on the catchment, in order to observe the natural and hydrologic phenomena to better understand them and to build methods and tools for their modeling.

After two years of monitoring, the first results showed that the network implemented allows to obtain informations on hydrometeorological process at high spatial and temporal resolution. In spite of the installation in a harsh mountain environment (access, cold, energy,...) a very good reliability, and a lot of perspectives of transposition on other catchments have been pointed up for low investment costs. The originality of the network is to have achieved a multi-sampling on a lot of hydrometeorological parameters (rain, temperature, snow, insulation,...), with spatial (10 to 50 meters) and temporal (hourly or less) resolution to perform a hydrological modeling at different scale both for the water resource management (long term) or flashflood prevention (short term). The sensors used in the network constitute a complementary and indivisible set of monitoring system : iButton (air and soil temperature), rain gauge, totalizer, cameras. The development of an innovative sensor for automatic cartography of the snow cover (SnoDEC) from terrestrial photographs was achieved during this work. This sensor allows to quantify spatial and temporal heterogeneity of snow cover evolution on the catchment, with images taken at regular time steps (5 to 7 frames per day). This heterogeneity is essential for understanding and modelling the hydrology considering the strong snow persistence (5 to 10 months).

The dense network set up on the catchment enables us to collect a large database and implement different interpolation techniques on hydrometeorological process on the catchment. Thus, accurate maps of temperatures and rain are created with a daily or hourly timestep. Furthermore, the SnoDEC sensor will permit to analyse and quantify the spatial and temporal heterogeneity (elevation, aspect, velocity of melting,...) of the snow cover.

From the database, we will better understand the hydrological mechanisms occurring on the site, and we will build the first ideas and method for the future modelisation. In the same time, the available data will be combined in order to highlight phenomena very difficult to measure (rain/snow limit, thermal inversion,...) and that will be used in the future to constrain accurately the snow and hydrologic models.

Because of the different parameters monitored and the use of imagery, the network is able to measure variables from many fields of study (glacier dynamic, vegetative cycle,...). Thereby, with its interdisciplinary approach the network thinks to implement a monitoring system at low cost in destination of the actors of study and research in mountain.

Keywords : *Hydrometeorology, monitoring, modeling, snow, mountain, imaging*

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé	vii
Table des matières	ix
Introduction	xvii
 Partie I Instrumentation des bassins versants de montagne :.....	 1
 Chapitre 1: Contexte général du bassin versant du Vorz :	 3
1.1 La crue du Vorz du 22-23 Aout 2005 :	5
1.1.1 Déroulement de la crue :	5
1.1.2 Contexte hydroclimatique : Un évènement non-isolé :	7
1.1.3 Conséquences de la crue du 22-23 Août sur le Vorz :	9
1.2 Programme Vorz :	12
1.2.1 La genèse du projet :	12
1.2.2 Résultats majeurs :	12
1.2.3 Et la suite.....	13
1.3 Contexte Géographique :	15
1.3.1 Localisation générale :	15
1.3.2 Bassin versant du Vorz (Saint-Agnès, Belledonne, 38)	17
1.4 Contexte Climatique & Hydrométéorologique :	19
1.4.1 Climatologie du Massif de Belledonne :	19
1.4.2 Hydrologie régionale et locale :	21
1.4.3 Evolution climatique :	23

TABLE DES MATIÈRES

1.5 Contexte Géologique & Géomorphologique :	26
1.5.1 Contexte géologique régional et local :	26
1.5.2 Géomorphologie du bassin versant du Vorz :	28
1.5.3 Occupation du sol et pédologie :	30
1.6 Hydrologie sur le Vorz :	32
1.6.1 Les grandes unités hydrologiques :	32
1.6.2 Ressources en eaux :	33
1.6.3 Caractéristiques hydrologiques :	34
1.7 Crues historiques :	36
1.7.1 Archives sédimentaires : Historique des crues à long terme :	36
1.7.2 Archives historiques : Historique des crues à court et moyen terme :	37
Chapitre 2: Etat de l'art de la mesure hydrométéorologique en montagne :	43
2.1 Capteurs hydrométéorologiques :	45
2.1.1 Historique :	45
2.1.2 Méthodes de mesures :	46
2.2 Résolution spatiale des réseaux de mesures traditionnels :	54
2.2.1 Réseau de mesure National :	54
2.2.2 Réseau de mesure régional et alpin :	55
2.2.3 Difficultés de mises en oeuvre et limites :	56
2.3 Techniques de mesure à distance :	60
2.3.1 Utilisation des moyens aériens et satellitaires :	60
2.3.2 Techniques de télédétection nivologique :	65
2.3.3 Du satellite à la vidéo-numérique :	67
2.3.4 Perspectives futures :	67
2.4 Vers la mise en place d'un réseau local à forte densité :	69
2.4.1 Les bassins d'études expérimentaux :	69
2.4.2 Application au Vorz :	71
Chapitre 3: Réseau de mesure à multi-échantillonnage :	75
3.1 Etude de la variabilité spatio-temporelle et topographique du bassin versant :	77
3.1.1 Variabilité morphologique :	77
3.1.2 Variabilité spatio-temporelle :	82
3.1.3 Multi-échantillonnage spatio-temporel, un concept d'instrumentation innovant :	85
3.2 Instrumentation Météorologique :	88
3.2.1 Un plan original d'instrumentation météorologique :	88
3.2.2 Stations météorologiques :	88
3.2.3 Mesures pluviométriques sur le Vorz :	94
3.2.4 Le réseau de iButtons :	95
3.3 Mesures Hydrométriques :	102
3.3.1 Le capteur IMAGINE :	102
3.3.2 Le capteur IMAGINE sur le Vorz :	103
3.4 Mesures Nivologiques :	105
3.4.1 Nécessité de la création d'un capteur nivologique original :	105
3.4.2 Mise en place et principe du capteur nivologique :	106

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 4: Observation hydro-météorologique sur le Vorz, analyse de deux années de fonctionnement :	111
4.1 Mesure du régime hydrologique : <i>La caméra IMAGINE</i> :	113
4.1.1 Un premier bilan du fonctionnement :	113
4.1.2 Analyse des événements de crues et de forts débits :	114
4.2 Climatologie sur le bassin versant du Vorz : <i>Les stations météorologiques</i> :	117
4.2.1 Mesure de la pluviométrie par les totalisateurs :	117
4.2.2 Stations météorologiques sur le Vorz :	119
4.2.3 Caractéristiques météorologiques locales :	123
4.3 Mesure du champ de températures : <i>Les iButtons</i> :	125
4.3.1 Mesure des températures locales :	125
4.3.2 Fiabilité et précision des mesures :	126
4.3.3 Températures du sol :	131
4.3.4 Températures dans l'air :	132
 Partie II Développement d'un capteur automatique à visée cartographique de la couverture neigeuse :	137
Chapitre 5: Principe du capteur SnoDEC :	139
5.1 Principe du capteur SnoDeC :	141
5.1.1 Génèse du principe d'échantillonnage ponctuel à haute résolution spatiale et temporelle :	141
5.1.2 Une idée centrale : La détection des zones enneigées :	142
5.1.3 Un challenge technique : La transformation d'une image 2D en cartographie 3D :	142
5.2 Caractéristiques techniques du capteur :	144
5.2.1 Cahier des charges :	144
5.2.2 Constitution générale du capteur :	144
5.2.3 Caractéristiques de l'appareil photographique : <i>Pentax K200D</i> :	144
5.2.4 Coût global du capteur :	145
5.3 Sites instrumentés sur le Vorz :	147
5.3.1 Installation des appareils :	147
5.3.2 Appareil photographique du Lac Blanc (2250 mètres) :	147
5.3.3 Appareil photographique du Refuge Jean-Collet (1950 mètres) :	149
5.4 Structure finale du système SnoDEC :	150
 Chapitre 6: De l'image 2D à la cartographie 3D : Implémentation de l'environnement 3D	153
6.1 Principe de passage de l'image à la représentation 3D :	155
6.1.1 Problématique :	155
6.1.2 Détermination d'un point de vue dans l'espace :	155
6.2 Création de la la Matrice des Transformations Géométriques :	156
6.2.1 Paramètres intrinsèques :	156
6.2.2 Les paramètres Extrinsèques de la MTG :	159
6.2.3 Ecriture de la MTG :	161

TABLE DES MATIÈRES

6.3 Calcul de la Matrice des Transformations Géométriques :	163
6.3.1 Création d'une MTG à partir des coordonnées terrain :	163
6.3.2 Calcul de la MTG par correspondance entre Image et Terrain :	163
6.3.3 Résolution du système d'équations et détermination de la MTG :	164
6.3.4 Choix d'une méthode d'inversion mathématique de la MTG :	166
6.4 Calibration d'un site de mesure et interface utilisateur :	167
6.4.1 Nécessité d'une calibration manuelle des sites de mesures :	167
6.4.2 Interface utilisateur de calage :	168
6.4.3 Exemples de calages :	170
6.5 Calcul des faces cachées et mise en 3D de l'image :	173
6.5.1 Algorithme de calcul des faces cachées :	173
6.5.2 Calcul des faces cachées sur les sites du Vorz :	175
Chapitre 7: Détection automatique de l'enneigement sur les images :	179
7.1 Détection de la neige à partir des codages couleur :	181
7.1.1 De la photographie au traitement numérique :	181
7.1.2 Système de codage colorimétrique :	183
7.2 Les difficultés de la détection automatique de la neige :	186
7.2.1 Techniques exploratoires de détection de la neige :	186
7.2.2 Difficultés relatives à la détection des surfaces enneigées en milieux naturels :	189
7.2.3 Calibration des zones enneigées :	191
7.3 Technique des "droites de neige" :	194
7.3.1 Principe de la technique :	194
7.3.2 Mise en oeuvre et applications :	195
7.4 Utilisation d'un réseau de neurones :	196
7.4.1 Définition et principe de fonctionnement des réseaux de neurones :	196
7.4.2 Implémentation d'un réseau de neurones spécifique à la détection de la neige :	197
Chapitre 8: Cartographie finale :	
Fiabilité, Précision et incertitudes :	201
8.1 Création des cartes d'enneigement :	203
8.2 Fiabilité du capteur :	203
8.3 Incertitudes du capteurs :	206
8.3.1 Incertitude spatiale du capteur SnoDEC :	206
8.3.2 Potentiel théorique de résolution du capteur :	207
8.3.3 Incertitude graphique de la détection de la neige :	208
8.4 Fiabilité et performances des protocoles mis en place :	210
8.4.1 Sélection des images :	210
8.4.2 Fiabilité et statistiques d'acquisition :	212
Chapitre 9: Création des cartes de couverture neigeuse :	215
9.1 Evolution de la couverture nivale sur le bassin versant :	217
9.1.1 Evolution de la couverture neigeuse sur le bassin versant Vorz :	217
9.1.2 Cartographie de l'enneigement :	220

TABLE DES MATIÈRES

9.2 Analyse des paramètres spécifiques aux modalités de fonte & accumulation :	223
9.2.1 L'altitude :	223
9.2.2 L'exposition :	224
9.2.3 Altitude et exposition :	225
9.2.4 La pente :	226
9.3 Informations spatiales et temporelles sur l'évolution du manteau neigeux :	227
9.3.1 Evolution mensuelle de l'enneigement sur le bassin versant du Vorz :	228
9.3.2 Evolution mensuelle de l'enneigement sur le bassin versant du Vorz en fonction de l'altitude et de l'exposition :	231
Chapitre 10: Utilisation alternative du capteur SnoDEC :	235
10.1 Mesure de la hauteur :	237
10.1.1 Détermination des points de références pour les hauteurs :	237
10.1.2 Principe de calcul de la hauteur : Equivalence taille pixel vs. Surface terrain :	239
10.1.3 Détermination des hauteurs de neige sur le bassin versant du lac Blanc :	242
10.1.4 Détermination des hauteurs de neige à la cabane du Replat du Pleynet :	245
10.1.5 Analyse de la faisabilité de la détection automatique des hauteurs de neige et des potentiels de résolution :	246
10.2 Etude de phénomènes physiques spécifiques :	249
10.2.1 Dynamique glaciaire :	249
10.2.2 Observation du cycle végétatif :	252
10.3 Application à différents sites de mesure :	257
Partie III Modélisation de l'hydrométéorologie en montagne :	261
Chapitre 11: Estimation des pluies sur le bassin versant :	263
11.1 Particularité du régime pluviométrique local :	265
11.1.1 Problème du fonctionnement du réseau en hiver :	265
11.1.2 Spécificité des événements intenses locaux :	266
11.1.3 Un gradient orographique particulier :	268
11.2 Utilisation de données alternatives pour recalibrer le réseau :	270
11.2.1 Utilisation des totalisateurs :	270
11.2.2 Intégration de la station de Chamrousse :	270
11.3 Méthodes d'estimation des précipitations locales :	277
11.3.1 Variabilité temporelle de la méthode :	277
11.3.2 Techniques d'estimations spatiales :	278
11.4 Génération des précipitations spatiales sur le Vorz :	282
11.4.1 Episode neigeux "hivernal" du 15 Mai 2010 :	282
11.4.2 Episode estival "orageux" du 5 Aout 2010 :	283
11.4.3 Episode printannier "pluvieux intense" du 31 mai 2011 :	283

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 12: Interpolation des Températures à partir du réseau :	287
12.1 Techniques d'analyses des données iButton et recalage par rapport aux stations de référence :	289
12.1.1 Caractéristiques générales des iButtons :	289
12.1.2 Calcul des gradients thermiques liés à l'altitude :	289
12.1.3 Calcul des gradients d'exposition :	292
12.1.4 Recalage par rapport aux stations :	292
12.2 Méthodes de calcul et d'interpolation des températures :	294
12.2.1 Interpolation des températures à partir des gradients thermiques :	294
12.2.2 Interpolation des températures du versant par génération des gradients locaux :	295
12.3 Génération des cartes de températures au pas de temps horaire :	298
12.3.1 Générations des cartes de températures journalières :	298
12.3.2 Modélisation de phénomènes météorologiques spécifiques : l'Inversion Thermique :	303
12.3.3 Modélisation de l'impact de l'exposition sur les températures en fonction des saisons :	304
Chapitre 13: Contraintes des modèles nivologiques et hydrologiques :	309
13.1 Utilisation des données des iButton-Sol :	311
13.1.1 Détection des dates clés pour le manteau neigeux :	311
13.1.2 Détermination des périodes de début d'accumulation :	313
13.1.3 Calcul de la vitesse d'ablation du manteau neigeux :	314
13.2 Utilisation d'images ponctuelles SnoDEC :	317
13.2.1 Détermination de la limite pluie/neige :	317
13.2.2 Détection de l'altitude de fonte :	320
13.3 Utilisation des cartes d'enneigement :	324
13.3.1 Analyse qualitative du comportement du couvert nival :	324
13.3.2 Analyse quantitative du comportement du couvert nival :	327
13.4 Première approche du calcul du facteur de fonte :	330
13.4.1 Méthode de calcul d'un facteur de fonte local :	330
13.4.2 Spatialisation du facteur de fonte :	331
Chapitre 14: Conclusions générales et perspectives :	335
14.1 Critiques et perspectives d'améliorations du réseau de mesure :	337
14.1.1 Suivi de l'hydrométrie :	337
14.1.2 Enregistrement de la pluviométrie :	338
14.1.3 Mesure des températures :	339
14.1.4 Cartographie du manteau neigeux :	340
14.1.5 Remarques et conclusions générales sur le réseau de mesure :	340
14.2 Vers une nouvelle compréhension des mécanismes hydro-météorologiques :	342
14.2.1 Climatologie et météorologie sur le Vorz :	342
14.2.2 Hydrologie du bassin versant :	343

TABLE DES MATIÈRES

14.3 Premiers pas vers la modélisation hydrologique du bassin versant du Vorz :	346
14.3.1 Météorologie :	346
14.3.2 nivologie :	346
14.3.3 Hydrologie :	348
14.3.4 Calage et fonctionnement du modèle :	349
14.3.5 Proposition de structure pour le futur modèle hydrologique	350
 Conclusion	 353
 Liste des figures	 367
 Liste des tableaux	 373
 Partie Annexes	 375
 Nouveau Chapitre de la Thèse (NCT®) :	 379
 Liste des Sites iButtons :	 399
 Liste des Stations météorologiques :	 437
 Colloques et Publications :	 441

TABLE DES MATIÈRES

Introduction

INTRODUCTION GENERALE

Dès l'antiquité chinoise, Nei Tsing Sou Wen écrit le premier ouvrage sur la météorologie (1^{er} millénaire avant J.C), dans lequel il réalisait les premières observations météorologiques pour améliorer le rendement des cultures. En 350 av J.C, Aristote utilise pour la première fois le terme de météorologie, dans le premier traité de Sciences de la Terre, à l'intérieur duquel il dessine pour la première fois les contours de ce que nous appellerons plus tard le cycle hydrologique :

« Maintenant le soleil, se déplaçant comme il le fait, met en branle un processus de changement, de devenir et de déclin qui par son action élève la plus fine et douce eau chaque jour, la dissout en vapeur et la transporte vers les hauteurs où elle se condense à nouveau par le froid et retourne ensuite à la terre. »

ARISTOTE (-350 av J.C), "Les météorologiques"

De tous temps, les hommes ont cherché à comprendre les mécanismes à l'origine du temps qu'il fait, des nuages, de la pluie, et de tous les phénomènes liés aux caprices du ciel. Tout d'abord, ce fut pour des raisons vitales, puisque cela conditionnait en grande partie le rendement des récoltes permettant de les nourrir. Aujourd'hui, la météorologie occupe une place importante dans notre société. La gestion des rendements et flux agricoles, la prévention des catastrophes naturelles ou encore l'impact sur l'économie touristique n'en sont que quelques exemples parmi d'autres.

L'hydrologie conditionne l'existence des quelques 7 milliards d'êtres humains qui peuplent la planète. Element clef de l'émergence de la vie sur Terre, l'eau a toujours été source de vie au sein du règne animal ou végétal. Elle devient aujourd'hui un des enjeux économiques et politiques majeurs du *XXI^{ème}* siècle, source de conflits, de famines ou de richesses.

Près de 25% des terres continentales sont des terrains de montagne, et abritent 10% de la population mondiale. Ainsi, les châteaux d'eau de la planète revêtent à l'heure actuelle une importance particulière et il est important de mieux comprendre comment se déroule le cycle de l'eau qui conditionne l'alimentation de 90% de la population mondiale. Dans une période d'évolution climatique sans précédent dans l'histoire de l'humanité, la cryosphère, élément clef du système, subit aujourd'hui de profonds changements et évolutions.

L'eau et la météorologie sont donc intimement liés par l'intermédiaire du cycle hydrologique. En montagne, l'hétérogénéité des paysages, et la vitesse d'évolution des processus météorologiques complexifient considérablement la mesure et la compréhension des phénomènes qui s'y produisent. C'est dans cette thématique que s'inscrit ce travail de recherche, qui s'appliquera à apporter sa modeste contribution dans l'art de mesurer, observer, comprendre et modéliser les systèmes naturels dans un domaine particulier :

L'HYDROMÉTÉOROLOGIE DES MILIEUX DE MONTAGNE.

HYDROMETEOROLOGIE EN MONTAGNE :

Mesurer, comprendre et modéliser l'hydrométéorologie en milieu de montagne est un challenge constant. En effet, on travaille sur un milieu marqué par une très forte variabilité spatiale et temporelle des phénomènes naturels qui s'y produisent et plus particulièrement des conditions climatiques et météorologiques. De plus, on est confronté à des zones difficiles d'accès, voire innaccessibles durant la longue période (hiver et parfois printemps, avalanches,...). Malgré ces contraintes, il est nécessaire d'acquérir des données météorologiques, et ce à différentes fins : la première de mieux appréhender les variations climatiques actuelles à haute altitude ; la seconde, d'en mesurer les effets sur les stocks et les écoulements hydrologiques qui présentent des enjeux majeurs pour notre société.

Le 22 et 23 Août 2005, un épisode pluviométrique intense a été à l'origine de crues très importantes sur l'ensemble des torrents du massif de Belledonne, et en particulier celui du Vorz. Durant cet épisode le hameau de *La Gorge* (Commune de Sainte-Agnès, Massif de Belledonne) a été fortement touché, avec la destruction d'une douzaine d'habitations et de la plupart des réseaux en place (eau potable et usée, électricité,...), causant près de 7 millions d'euros de dégâts. A la suite de cet événement, des programmes d'étude et de recherche visant à mieux comprendre les phénomènes à son origine ont été mis en place, impliquant en particulier le laboratoire EDYTEM.

Ces travaux ont mis en évidence le manque de données nécessaires à une analyse fine de ce phénomène et à la modélisation de l'hydrométéorologie de ce bassin versant (cf. *"Rapport Vorz" dirigé par F.Allignol, 2008, [1]*). Dans ce cadre, il a été décidé de faire de ce bassin versant un site d'étude privilégié pour le laboratoire. A cette occasion, un réseau de mesure hydrométéorologique financé par l'Université de Savoie (PROJET MONTEVIDEO, EDYTEM, BQR UNIVERSITÉ DE SAVOIE) a été mis en place dès Novembre 2008. C'est dans ce contexte que s'est déroulé cette recherche doctorale.

Le bassin versant du Vorz comme beaucoup de bassin versant de montagne présente une forte variabilité spatiale et temporelle à la fois des précipitations et des températures. A cette variabilité, il faut ajouter la complexité morphologique, notamment au travers d'un étagement altitudinal important (plus de 2000 mètres jusqu'à la plaine de l'Isère). La présence d'une couverture nivale conséquente, voir de glace (Glacier de Freydane), influe considérablement sur l'eau disponible pour les écoulements et donc sur l'hydrologie du torrent. Une difficulté supplémentaire s'ajoute donc ici pour modéliser de façon satisfaisante l'hydrologie de ce torrent. Il devenait nécessaire de mesurer, comprendre et modéliser les différents phénomènes nivologiques tels que l'accumulation, la fonte, et les processus particuliers affectant l'évolution du manteau neigeux au cours de l'année. Pour cela, nous avons mis en place, et développer des équipements spécifiques, capables de mesurer cette hétérogénéité.

Dans un contexte d'évolution climatique, de fonte des glaciers, de hausse des limites d'enneigement, l'augmentation des pressions anthropiques sur les ressources en eau en zones de montagne (aménagements, tourisme,...), joue un rôle évident d'intensification des conflits. La neige et les glaciers constituent donc une ressource en eau importante. Dans ce cadre, il est également essentiel de connaître le plus précisément possible les mécanismes nivologiques et hydrologiques, de manière à les modéliser, pour pouvoir fournir aux décideurs des outils d'aide

à la décision et de gestion des ressources en eau.

L'instrumentation et la mesure des phénomènes hydrométéorologiques, étape préalable à toute modélisation du système torrentiel, constitue le socle de notre recherche. Au cours de ces trois années de thèse, l'objectif a donc été :

- de mettre en place un réseau de mesure capable de rendre compte des hétérogénéités spatiales et temporelles de l'hydrométéorologie de ce bassin versant.
- de limiter le coût des équipements en privilégiant la mise en place d'un réseau de mesure innovant basé sur un grand nombre de capteurs partiels ponctuels, plutôt que sur des équipements complets (complexes et coûteux) sur un nombre plus restreint de sites pouvant de fait ne pas refléter l'hétérogénéité du milieu.
- de développer une technique et des méthodologies transposables à d'autres bassins versants de ce type, et accessibles à différents acteurs.

PROBLEMATIQUES DE RECHERCHE :

L'instrumentation et la compréhension des processus hydrométéorologiques en montagne sont le cœur de nos travaux de recherche. Le terrain d'étude est le bassin versant du Vorz dans le Massif de Belledonne. L'objectif à long terme, au delà de ce travail, sera de construire un modèle intégré de la nivologie et de l'hydrologie, de la gestion raisonnée des ressources en eau, et de la prévention des crues sur le site d'étude.

La première problématique traitée dans ce mémoire est la mise en place d'un réseau d'instrumentation cohérent sur le bassin versant. De manière à rendre transférable ce type d'instrumentation, il a été volontairement décidé de limiter fortement le coût des capteurs installés. Le coût des instruments de mesure est une réelle contrainte dans l'acquisition des données en haute montagne, or, il s'agit d'instrumenter un bassin de montagne où la variabilité spatiale et temporelle des phénomènes est forte. Dans ce contexte, il a été nécessaire de penser des capteurs innovants et bon marché, permettant de rendre compte au mieux de la réalité physique sur le terrain (pluie, températures, débits,...).

La seconde contrainte à laquelle nous avons été confrontés a été de ne pouvoir disposer des réseaux d'alimentation en énergie traditionnels, nécessaire à l'exploitation de certains matériels. L'évolution sur le terrain étant difficile pendant la saison hivernale, les capteurs laissés à demeure doivent fonctionner et enregistrer des données durant tout l'hiver. Ils devront se montrer, à la fois, autonomes en énergie et en capacité de stockage mémoire, mais également robustes pour résister aux périodes de gels et de faible ensoleillement.

INTRODUCTION

La **première partie** du mémoire vise à répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les variables clefs du système hydrologique à instrumenter en zone de montagne ?
- Comment mettre en place un réseau d'instrumentation hydrométéorologique rendant compte de l'hétérogénéité spatiale et temporelle des bassins versants de montagne ?
- Quel matériel utiliser en milieux difficiles pour réaliser des mesures précises, cohérentes et continues durant toute une saison, pour un investissement financier raisonnable ?
- Quels sont les premiers résultats de ce réseau en terme de fiabilité et de collecte de données depuis son installation en Novembre 2008 ?

La présence de neige une grande partie de l'année constitue la spécificité essentielle du bassin versant du Vorz. L'hétérogénéité spatiale et temporelle, aussi bien en terme de répartition horizontale (falaises, rochers, combes, col,...) que verticale (hauteur, structure du manteau neigeux, transport par le vent,...) est caractéristique des bassins versants de montagne. Nous souhaitons ici obtenir des données avec au minimum un pas de temps journalier, et une résolution de quelques mètres sur le terrain. Cependant, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthodes permettant d'obtenir directement ce genre de données. En conséquence, nous avons choisi de développer un système de mesure correspondant aux contraintes imposées. La présentation de ce capteur innovant est l'objet de la **deuxième partie** du mémoire.

Après avoir analysé les différentes possibilités s'offrant à nous quant au choix du type d'instrumentation, celui-ci s'est finalement porté sur une méthode de mesures par imagerie. Le développement de ce capteur a nécessité de relever un certain nombre de challenges portant sur plusieurs disciplines très différentes. Le résultat est un capteur photographique autonome en énergie et installé en permanence sur le bassin versant, observant et enregistrant l'évolution du manteau neigeux en temps réel. Outre ce système de capture de données, il a été nécessaire d'implémenter les algorithmes mathématiques permettant de passer automatiquement, quelles que soient les conditions, d'une photographie à une cartographie réelle de l'enneigement sur le bassin. Pour cela, nous avons dû répondre aux problématiques suivantes :

- Quel type d'appareils photographiques utiliser, et comment les alimenter en énergie ?
- Comment passer d'une image en 2 dimensions à une cartographie en 3 dimensions du bassin versant ?
- Quels algorithmes permettent de détecter automatiquement la neige sur des photographies quelles que soient les conditions (lumière, temps,...) ?
- Quelle est la fiabilité du capteur ? Quelle est sa résolution et quelles en sont les incertitudes ?
- Comment construire et analyser les cartographies d'enneigement sur l'ensemble d'une saison ?

L'objectif à plus long terme est de mettre en place un modèle intégré de simulation nivologique et hydrologique, permettant de mieux mesurer et quantifier les ressources en eau. Pour fonctionner de manière satisfaisante, ces modèles ont besoin de données précises et d'une bonne compréhension des processus hydrologiques en montagne. C'est l'objectif de la **troisième partie** du mémoire : dessiner les premiers contours des outils destinés à la modélisations.

La température et la pluviométrie sont deux valeurs particulièrement difficiles à quantifier en zone de montagne, en raison de leur très forte hétérogénéité spatiale et temporelle. Le challenge relevé dans la première partie a été de les instrumenter, ici, notre objectif est, à partir des mesures de terrain, d'en cartographier la variabilité de manière précise au cours du temps. Nous analyserons également comment le réseau mis en place et la diversité des paramètres ponctuels mesurés peut nous aider à contraindre les modèles hydrologiques. Nous discuterons alors dans quelle mesure le réseau implémenté a répondu à nos attentes et a permis de mieux appréhender les mécanismes hydrologiques sur le Vorz. Enfin, on s'attachera à dessiner les contours du modèle nivologique et hydrologique, développé en étroite liaison avec le réseau de mesure. En d'autres termes, nous commencerons à répondre aux problématiques suivantes :

- Comment générer des cartographies de température au pas de temps horaire à partir du réseau de mesure ?
- Comment interpoler la pluviométrie à partir des données disponibles sur le Vorz et dans le massif de Belledonne ?
- De quelle manière est-il possible de contraindre les modèles hydrologiques à partir de données spatiales et temporelles ponctuelles à haute résolution ?
- Quelles sont les perspectives d'évolution du réseau d'instrumentation ? Dans quelle mesure permet-il de comprendre les mécanismes hydrométéorologiques ?
- Est-il possible de dessiner les contours d'un futur modèle intégré de modélisation nivologique et hydrologique destiné à la gestion des ressources en eau en montagne ?

Le mémoire de Thèse est construit selon les trois grandes parties suivantes :

1. Instrumentation des bassins versants de montagne
2. Développement d'un capteur automatique de cartographie la couverture neigeuse
3. Contribution à la modélisation de l'hydrométéorologie en montagne

L'objectif est de répondre aux attentes des différents acteurs travaillant sur la thématique de l'hydrologie en montagne, en développant des approches instrumentales et modélisatoires originales.

Cet ouvrage construit sous forme de retour d'expérience d'un programme d'instrumentation, permettra d'apporter notre contribution à cette thématique riche et complexe qu'est l'hydrométéorologie de montagne, en mettant en avant nos échecs et réussites, dans ce processus incertain et risqué que constitue l'instrumentation des bassins versants de montagne.

Première partie:

Instrumentation des bassins versants de montagne :

Chapitre 1:

Contexte général du bassin versant du Vorz :

Sommaire du Chapitre:

1.1 La crue du Vorz du 22-23 Aout 2005 :	5
1.1.1 Déroulement de la crue :	5
1.1.2 Contexte hydroclimatique : Un évènement non-isolé :	7
1.1.3 Conséquences de la crue du 22-23 Août sur le Vorz :	9
1.2 Programme Vorz :	12
1.2.1 La genèse du projet :	12
1.2.2 Résultats majeurs :	12
1.2.3 Et la suite... ..	13
1.3 Contexte Géographique :	15
1.3.1 Localisation générale :	15
1.3.2 Bassin versant du Vorz (Saint-Agnès, Belledonne, 38)	17
1.4 Contexte Climatique & Hydrométéorologique :	19
1.4.1 Climatologie du Massif de Belledonne :	19
1.4.2 Hydrologie régionale et locale :	21
1.4.3 Evolution climatique :	23
1.5 Contexte Géologique & Géomorphologique :	26
1.5.1 Contexte géologique régional et local :	26
1.5.2 Géomorphologie du bassin versant du Vorz :	28
1.5.3 Occupation du sol et pedologie :	30
1.6 Hydrologie sur le Vorz :	32
1.6.1 Les grandes unités hydrologiques :	32
1.6.2 Ressources en eaux :	33
1.6.3 Caractéristiques hydrologiques :	34
1.7 Crues historiques :	36
1.7.1 Archives sédimentaires : Historique des crues à long terme.	36
1.7.2 Archives historiques : Historique des crues à court et moyen terme	37

Introduction du Chapitre 1 :

Le bassin versant du Vorz constituera donc notre site d'étude essentiel pour l'ensemble de ce travail. Dans un premier temps, nous allons nous attacher à en définir les caractéristiques principales. Au regard de la thématique des recherches que nous allons mener sur l'hydrométéorologie, de nombreux paramètres entrent en jeu dans les modalités de fonctionnement, de réaction, et de comportement du bassin versant.

L'élément fondateur de ce programme de recherche étant la crue de Août 2005, nous reviendrons tout d'abord sur son déroulement, ses mécanismes de formation probables, et les questions qui se posent sur la génération de ce type d'évènement. Après avoir défini le contexte géographique du bassin, nous présenterons de manière générale sa morphologie (géologie, géomorphologie), météorologie, climatologie qui ont un impact fort sur le comportement hydrologique des bassins versants. Cette présentation sera également l'occasion de rappeler la complexité des mécanismes hydrométéorologiques en montagne, et le besoin de mieux les comprendre pour mieux les anticiper. Nous mettrons alors en évidence les caractéristiques hydrologiques principales du torrent du Vorz qui nous intéresseront par la suite. Enfin, nous essaierons de mettre en évidence des caractéristiques de fréquence et d'intensité aux crues se produisant sur le torrent du Vorz par l'intermédiaire de différents types d'archives.

Nota Bene : La plupart des résultats de ce chapitre sont extraits du Rapport scientifique sur le bassin versant du Vorz, réalisé à la suite de la crue de 2005, et dirigé par Françoise Alignol ([Rapport Vorz, 2008, \[1\]](#)).

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

Section 1.1

La crue du Vorz du 22-23 Août 2005 :

Les 22 et 23 Août 2005, la commune de Saint-Agnès est touchée par une très forte crue torrentielle affectant tout particulièrement le hameau de la Gorge, en bordure du torrent du Vorz. Durant ces deux journées, des précipitations exceptionnelles (300 mm au refuge de la Pra) s'abattent sur le haut du bassin versant dont le sommet du Grand Pic de Belledonne (2977 mètres), et engendrent de très forts débits sur l'ensemble des torrents du massif.

1.1.1 Déroulement de la crue :

L'évènement pluvieux lié à la crue commence le 21 août en fin de soirée. Bien qu'il soit relativement faible en plaine (1-2 mm/h pour 25 mm le 21 au Versoud), il se poursuit de manière intense tout au long de la nuit en altitude (5-6 mm/h à Chamrousse pour un cumul journalier de 99 mm) et haute altitude. Après une accalmie matinale, les précipitations reprennent intensément en altitude durant la journée du 22 (12h-18h). L'évènement baisse alors en intensité et prend fin durant la nuit du 22 au 23 Août.

1.1.1.1 Lundi 22 Août 2005 :

a) 4h - 6h :

Le Lundi 22 au matin, le torrent du Vorz présente déjà un débit relativement fort, capable de transporter une charge solide conséquente qui a pour effet d'engraver la microcentrale (1015 mètres) qui lance un message d'alerte. Venus constater le problème, deux responsables de la commune sont alors témoins du passage d'une lave torrentielle de 7 à 8 mètres de hauteur au niveau de la centrale.



FIG. 1.1: Début du débordement du Vorz le 22 à 9h

b) Matinée :

Au cours de la matinée, le débit du Vorz se renforce pour atteindre minima les $20 m^3$, engendrant des débordements et engravements significatifs au niveau du hameau de La Gorge. En fin de matinée, des pelles mécaniques commencent à curer le lit du torrent afin de maintenir un débit adapté.

1.1. LA CRUE DU VORZ DU 22-23 AOÛT 2005 :



FIG. 1.2: Engravement progressif du lit et débordement sur les aménagements à partir de 10h

c) *Après-midi et soirée :*

Devant la reprise des précipitations en altitude et la détérioration de l'état du lit du cours d'eau au niveau du village, la décision est prise d'évacuer les habitants pour la nuit.



FIG. 1.3: Curage du lit du torrent pour maintenir la capacité d'écoulement dès la fin de la matinée

1.1.1.2 Mardi 23 Août 2005 :

Cette nuit du 22 au 23 Août est marquée par une reprise des précipitations en altitude.

a) *Nuit :*

Tout au long de la nuit, le débit du Vorz reste fort, et les travaux de curages se poursuivent. Malgré tout, plusieurs bouffées torrentielles se produisent venant dégrader les capacités d'écoulement du torrent déjà précaires.

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :



FIG. 1.4: Création de digues à partir des matériaux chariés pour canaliser le lit en fin d'après-midi

b) Journée :

L'évènement pluvieux marque enfin le pas durant cette journée du 23, mais le débit du torrent reste soutenu. En amont du village, on observe de nombreux éboulements et glissements de terrain le long des berges du Vorz.



FIG. 1.5: Début de la décrue le 23 Août au matin

1.1.2 Contexte hydroclimatique : Un évènement non-isolé :

Cette crue du Vorz a été remarquable de part son intensité, bien que les caractéristiques de l'évènement pluvieux n'aient pas été exceptionnelles en plaine. Il en découle donc un comportement spécifique de l'évènement pluvieux en altitude durant cette crue sur le massif de Belledonne. De plus, cet évènement s'inscrit dans une période fortement perturbée pendant laquelle se sont produites d'importantes inondations sur l'ensemble de l'arc Alpin.

1.1.2.1 La crue d'Août 2005, une situation climatique perturbée générale :

Dans un contexte plus général, les crues du Massif de Belledonne se sont produites en marge d'un évènement bien plus intense et général, qui s'est déroulé entre les 22 et 27 Août à l'échelle du massif alpin ([Benniston, 2006, \[10\]](#)). Une forte perturbation a traversé l'ensemble du massif, touchant plusieurs pays européens parmi lesquels la Suisse, l'Autriche, l'Allemagne ([Hohenegger, 2008, \[60\]](#)) sont les plus affectés. Ces crues sont les plus meurtrières en Europe

1.1. LA CRUE DU VORZ DU 22-23 AOUT 2005 :

	Altitude	Pluie - 21 Août (1)	Pluie - 22 Août (1)	PJ ₁₀ estimée (2)
Le Rivier	1270 m	79 mm	68 mm	113 mm
Allevard EDF	495 m	16 mm	10 mm	70 mm
Fond de France	1082 m	92 mm	60 mm	88 mm
Ferrière	815 m	-	-	85 mm
Revel	630 m	44 mm	16 mm	75 mm
Tencin	236 m	23 mm	11 mm	74 mm
Theys	615 m	26 mm	15 mm	76 mm
Versoud	220 m	25 mm	7 mm	75 mm
Verney	772 m	-	-	93 mm
Refuge de la Pra	2109 m	174 mm	126 mm	-
Chamrousse	1730 m	99 mm	60 mm	-
(1)- Données Alp'Géorisques, 2006 (2)- Données Météo France, Cemagref, ERGH				

TAB. 1.1: Enregistrement pluviométriques sur le massif de Belledonne pendant l'évènement pluvieux de Août 2005

depuis celles de 2002 et on déplore 42 victimes sur l'ensemble des régions touchées. Au total, les dégâts engendrés par ces inondations sont estimés à plus de un milliard d'euros (*Ministère de l'écologie et du développement durable, 2006, [18]*).

1.1.2.2 Précipitations sur le Massif de Belledonne :

Le caractère intense des précipitations, notamment à haute altitude a joué un rôle majeur dans la genèse et le déroulement de cette crue. Le tableau suivant (tab. 1.1) montre les enregistrements pluviométriques effectués dans le massif de Belledonne (cf. *Rapport Vorz, 2008, [1]*). On observe ainsi que de manière générale, les précipitations n'ont pas été exceptionnelles en plaine (inférieures aux pluies décénales au Versoud ou à Revel). Cependant, en haute montagne, les cumuls ont atteint des valeurs remarquables voisines de 100 mm le 21 (Fond de France, Chamrousse, La Pra).

1.1.2.3 Crues sur les autres bassins versants :

Lors de cet épisode majeur, le Vorz n'est pas le seul torrent à être sorti de son lit et avoir engendré des dégâts, puisque, le Doménon, le torrent de la Combe de Lancey et le Mas Julien ont également été le théâtre de fortes crues. La localisation de ces trois torrents souligne que c'est la bordure ouest du Massif de Belledonne qui a connu un contexte météorologique particulier. Les bassins versants touchés par cet évènement météorologique sont donc :

- Le bassin versant du Vorz (Communes de Sainte-Agnès et Villard-Bonnot)
- Le bassin versant de la Combe de Lancey (Communes de La Combe-de-Lancey et Villard-Bonnot)
- Le bassin versant du Domonéon (Communes de Revel et Domène)

Il n'y a heureusement pas eu de victimes à déplorer sur ces trois bassins, en revanche, les dégâts matériels ont été relativement importants. Dans la plupart des cas, des engravements et destructions partielles des ouvrages hydrauliques ont été signalés et plusieurs zones urbaines ont été touchées, comme en témoignent les photographies du village après la crue (1.6).

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :



FIG. 1.6: Bilan des dégâts dans le hameau de la Gorge après la crue de Août 2005

1.1.3 Conséquences de la crue du 22-23 Août sur le Vorz :

1.1.3.1 Bilan matériel sur la commune de Saint-Agnès :

Comme on l'a vu précédemment, cette crue n'a pas fait de victimes. Cependant, elle a nécessité l'évacuation du hameau de la Gorge pendant la nuit du 22 au 23 Août 2005. Le débordement du Vorz a causé l'engravement d'une douzaine de maisons, y compris des anciens édifices tels que le moulin par exemple. Dans les limites directes du village, la crue a détruit la route communale sur environ 2 kilomètres en bordure du torrent et a provoqué le dépôt de 20 000 à 30 000 m^3 de matériaux le long du lit. Les infrastructures hydrauliques (alimentation en eau potable et évacuation des eaux usées), ainsi que certaines structures électriques ont également souffert de cette crue. Plus en aval, en descendant vers la vallée de l'Isère, le débordement du Vorz a été évité de justesse au niveau de Brignoud où une plage de dépôt a retenu environ 8 000 m^3 de matériaux.

Au total, les dégâts générés par le Vorz sur la commune de Saint-Agnès ont été estimés à près de 7 millions d'euros. Par la suite, et à l'image de plusieurs communes du Piémont du massif de Belledonne, la commune de Saint-Agnès a été reconnue par l'état comme "Catastrophe naturelle", facilitant ainsi l'indemnisation des victimes de la crue. Aujourd'hui, malgré un impact psychologique très fort sur les habitants de la commune, les travaux d'endiguement et de protection du village ont permis la reconstruction du hameau et le retour de la population.

1.1.3.2 Impacts morphologiques sur le bassin versant

L'essentiel des impacts de la crue, notamment sur les infrastructures bâties a eu lieu au niveau des replats, situés à l'aval des fortes pentes des hautes crêtes du massif de Belledonne : les "Balcons de Belledonne". Cependant, même si les dégâts majeurs sont restés concentrés en bordure de cette zone, de nombreux changements morphologiques se sont produits sur le versant. En effet, en plusieurs endroits, des affouillements considérables ont été observés, notamment au niveau du replat du Habert du Mousset où le lit du Vorz s'est enfoncé de 4 mètres durant la crue (les gardiens du refuge Jean-Collet ont rapporté que le lit était large d'environ 40 mètres au moment de la crue).

La zone située juste en aval du replat du Pleyne a été le lieu de déclenchement de la principale bouffée torrentielle de la crue. De fait, l'ensemble de cette zone a vu ses berges se destabiliser et s'éroder au fur et à mesure de cet épisode. Aujourd'hui, fortement remaniée, elle a été "stabilisée" par l'intervention de moyens mécaniques mais reste une source importante de matériaux en cas de forts écoulements futurs. Au niveau du village de Saint-Agnès, l'engravement du lit du Vorz a été corrigé avec la mise en place d'un chenal d'écoulement

1.1. LA CRUE DU VORZ DU 22-23 AOUT 2005 :

endigué, et d'une plage de dépôt juste en amont. En cas d'épisode de crue limité, avec de fortes charges solides, il sera donc possible de limiter les dégâts sur le hameau. L'ensemble des changements observables sur le lit du Vorz sont présentés dans la figure 1.7.

Enfin, une des conséquences morphologiques annexes de cet épisode pluvieux a été le

Evolution de la morphologie du lit du Vorz entre 2005 et 2007

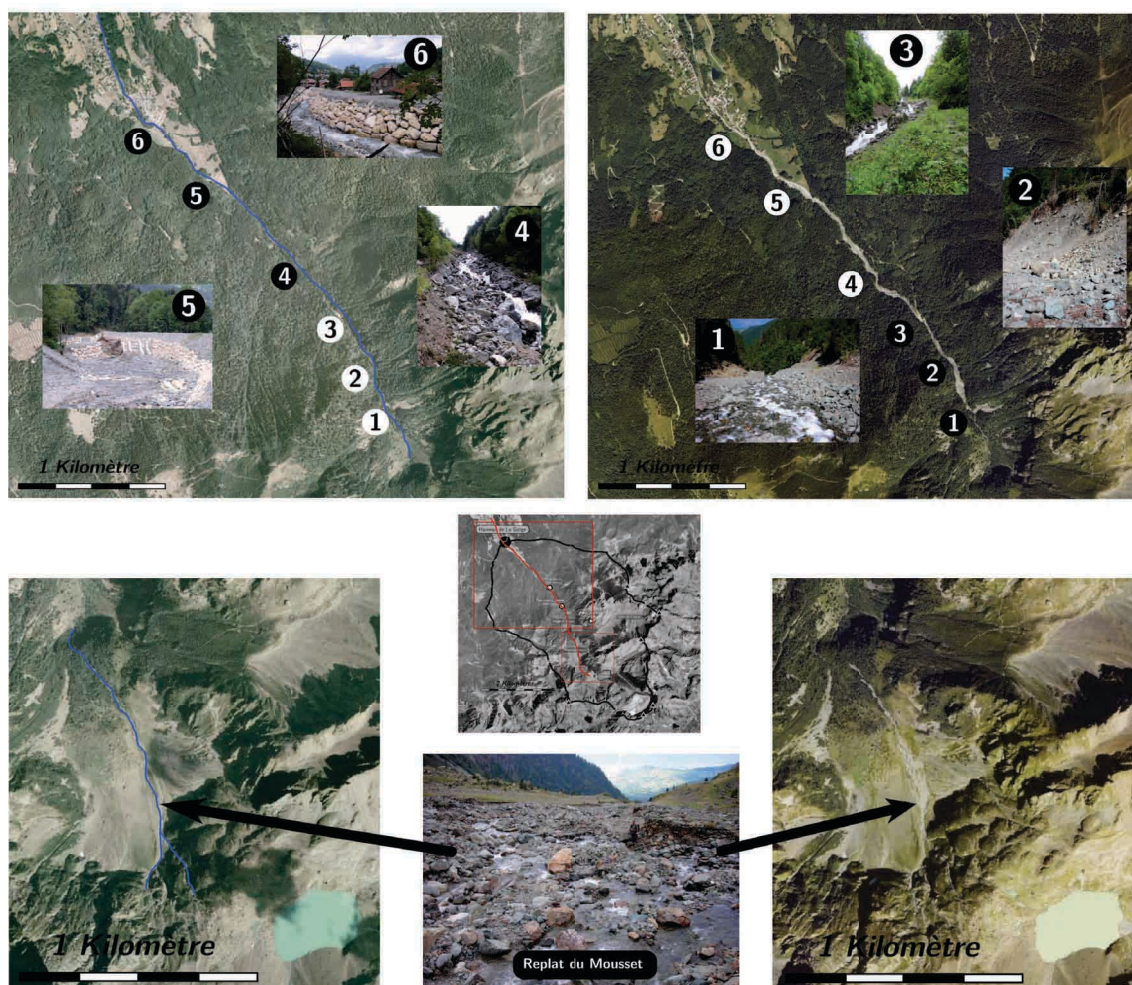


FIG. 1.7: Comparaisons morphologiques sur le lit du Vorz entre 2005 et 2007

déclenchement de glissements de terrains dans les parties hautes du bassin versant, en particulier dans la zone du Lac Blanc. Les fortes précipitations tombées en une période de temps aussi court, ont par endroit destabilisé les versants, comme en témoigne l'éboulement qui s'est produit en face nord du Grand Pic de Belledonne à cette date, et dont les traces sont encore visibles aujourd'hui sur le glacier de Freydane (cf fig.1.8).

1.1.3.3 Compréhension de la dynamique des crues dans le Massif de Belledonne :

Les crues des Balcons de Belledonne de Août 2005 ont été marquées par l'absence d'alerte au niveau des villages touchés. En réalité, les précipitations relativement faibles en plaine suc-

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :



FIG. 1.8: Eboulement en face nord du Grand Pic de Belledonne à la suite de l'évènement de 2005

cédant à une période relativement sèche n'ont pas inquiété l'ensemble des services concernés. Par la suite, cet évènement sera comparé à un épisode cévennol (*Rapport Vorz, 2008, [1]*), violent et dévastateur, au vu de son intensité et de sa localisation très limitée. De même, l'importance de la crue qui s'est développée jusque dans la plaine de l'Isère a pris de court la plupart des personnes de la région. C'est dans ce contexte d'urgence que le village de Saint-Agnès a été évacué, après intervention et évaluation sur le terrain des services de l'état (RTM, préfet, pompiers,...).

A la suite de l'évènement, l'ensemble des acteurs (service de prévention/prévision, représentant des communes,...) se sont rassemblés afin de mettre en place un programme permettant de comprendre dans un premier temps les mécanismes de déclenchement et de déroulement de la crue de 2005. Ainsi, le CEMAGREF-ETNA de Grenoble a piloté une étude en collaboration avec le laboratoire EDYTEM, financée par le Pôle Risques Grenoblois. Par la suite, la volonté de certains élus, et notamment ceux de Saint-Agnès, la commune la plus touchée, a été de poursuivre les investigations, et a abouti à la formalisation du "programme Vorz".

Programme Vorz :

1.2.1 La genèse du projet :

Les conclusions des premiers retours d'expérience sur la crue ont montré que l'on ne disposait pas des données suffisantes sur les paramètres physiques du bassin permettant de mieux appréhender la dynamique du système torrentiel. Il est également apparu indispensable de remonter dans le temps plus loin que la mémoire humaine, afin de replacer cet événement dans un contexte météorologique et historique. Le "Programme Vorz" est donc né de la volonté de mieux comprendre les mécanismes de crues sur le Vorz.

Dans le cadre de ce projet piloté par *F.Allignol*, le Laboratoire EDYTEM a travaillé en collaboration avec la commune de Saint-Agnès. L'objet était d'améliorer les connaissances du fonctionnement du haut bassin versant, puisque c'est dans cette zone que la majeure partie de la crue a été générée. Un programme d'étude pluridisciplinaire (hydrologie, géologie, géomorphologie, sédimentologie, histoire,...) a donc été mis en place afin d'étudier les points suivants :

- Reconstitution et chronologie du déroulement de la crue et de ses impacts : Cette crue présente-t-elle un caractère exceptionnel ?
- Mise en perspective historique au travers d'archives historiques et naturelles :
 - o Analyse de la "mémoire humaine" à partir des archives disponibles depuis deux siècles et demi.
 - o Etude des sédiments lacustres du Lac Blanc enregistrant la dynamique environnementale passée.
- Etudes des paramètres influençant la dynamique torrentielle :
 - o Paramètres géographiques et hydrologiques
 - o Paramètres géologiques et géomorphologiques
 - o Paramètres météorologiques et climatiques
 - o Autres paramètres physiques, environnementaux, humains (occupation des sols,...),...

L'ensemble des ces paramètres seront reconsidérés et détaillés dans le cadre de ce chapitre. Enfin, ce programme visait à évaluer l'aléa torrentiel et les ressources en eau sur le bassin, dans un contexte d'évolution climatique.

1.2.2 Résultats majeurs :

Ce projet s'est appuyé sur l'apport de chercheurs de différents champs disciplinaires (hydrologie, géologie, géomorphologie, sédimentologie, histoire,...), afin de mieux cerner les phénomènes torrentiels sur un torrent de haute montagne, ici dans le massif de Belledonne. Il ressort ainsi du rapport final conduit par *F.Allignol* plusieurs idées et conclusions fortes que nous allons détailler. L'ensemble des points suivant sont extrait de ce rapport réalisé en 2008 (*Rapport Vorz, 2008, [1]*).

a) Réccurrence des évènements torrentiels :

L'étude des archives historiques a permis de remonter jusqu'au milieu du *XVIII^{ème}* siècle et met en évidence une récurrence dans les événements de crues majeures. En effet, depuis environ 250 ans, une vingtaine de crues ont été recensées. On retiendra plus particulièrement les crues de 1851 et 1852 qui présentent une ampleur comparable à celle de 2005.

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

b) Contexte climatique :

Parmi les évènements recensés, les crues de 1851 et 1852 correspondent à la période de réchauffement de la fin du petit âge glaciaire. En revanche, les crues de 1987, 2005 et 2007 semblent pour leur part plus relever des conséquences de l'évolution climatique actuelle. En tout état de cause, il apparaît donc que les phénomènes de crues semblent être reliés aux périodes de réchauffement des températures.

c) Fréquence et intensité :

L'étude des sédiments du Lac Blanc est un des objets d'étude d'une thèse réalisée actuellement par *B. Wilhelm* au laboratoire EDYTEM. Elle a mis en évidence une évolution claire de l'intensité et de la fréquence des évènements torrentiels dans la partie haute du bassin au cours du vingtième siècle, et plus spécifiquement lors des 30 dernières années. Ces archives montrent également le caractère non-isolé de l'évènement de 2005 et semble indiquer une tendance à la baisse du nombre de crues torrentielles, mais à la hausse de leur intensité.

d) Morphologie du versant :

Dans la partie haute du versant, la présence du Lac Blanc n'a pas d'effet tampon sur les crues. En effet, au regard de sa capacité relativement limitée de stockage d'eau, il ne peut jouer le rôle d'écrêteur de crues.

En plusieurs zones de son cours, le Vorz est caractérisé par une recharge sédimentaire que l'on peut considérer comme illimitée (Bassin du Lac Blanc, replat du Mousset, "Gorges du Vorz"). On estime qu'en aval de la prise d'eau du Pleynet, sur un linéaire d'environ 800 mètres, la quantité de matériaux mobilisables en cas de crue est de plus de 150 000 m³ (*Rapport Vorz, 2008, [1]*, p.144). Cette estimation signifie que le débit du torrent sera le seul facteur déclenchant de futures laves torrentielles ou charriages hyperconcentrés.

A l'heure actuelle, le bassin versant du Vorz n'est pas stable, le profil d'équilibre du torrent est loin d'être atteint, ce qui l'amène à éroder son lit et les berges de manière continue, et à déposer ces matériaux dès que la pente diminue (estimée à 10%). Cette tendance s'observe, non seulement en cas de crue exceptionnelle, mais également à chaque période de forts débits ou de fonte.

e) Protection contre les crues :

Il ressort de cette étude que le Vorz se caractérise par des ressources en matériaux illimitées, avec un versant répondant rapidement aux épisodes pluvieux. A terme et dans un futur proche, ce torrent peut potentiellement être à nouveau responsable de dégâts importants sur la commune de La Gorge. En conséquence, il est vivement recommandé de ne pas densifier le bâti (*Rapport Vorz, 2008, [1]*, p.199), afin d'éviter d'augmenter la vulnérabilité le long du cours d'eau.

A la suite de la crue de 2005, des ouvrages de protection ont été réalisés (endiguement, plage de dépôt). Cependant, ces ouvrages sont dimensionnés pour des crues décennales voir centennales et pourraient être d'une efficacité limitée en cas de crue très importante telle que celle de 2005 (*Rapport Vorz, 2008, [1]*, p.199).

1.2.3 Et la suite...

Suite à cette première étude du bassin versant du Vorz, il est apparu nécessaire de travailler sur la prévision ou du moins l'anticipation des crues. Dans ce contexte, des financements ont

1.2. PROGRAMME VORZ :

été levés par l'Université de Savoie, afin de mettre en place un suivi hydrométéorologique du bassin versant, et de mieux comprendre ces processus, plus particulièrement en zone de haute montagne, en vue de les modéliser. C'est dans ce cadre que s'est déroulée cette thèse, dont les résultats vont être présentés dans les prochains chapitres.

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

Section 1.3

Contexte Géographique :

1.3.1 Localisation générale :

1.3.1.1 Localisation nationale : *France, Alpes*

Le bassin versant du Vorz est situé dans le massif alpin, sur la bordure occidentale du Massif de Belledonne, à proximité de la ville de Grenoble.



FIG. 1.9: Localisation du bassin versant du Vorz en France

1.3.1.2 Localisation régionale : *Région Isère, bassin grenoblois*

Au niveau régional, nous sommes situés dans la Région Rhône-Alpes à la transition entre les massifs pré-alpins (Chartreuse, Vercors) et les premiers contreforts des massifs alpins proprement dit (cf. figure 1.10). Ces deux ensembles sont séparés par la vallée de l'Isère qui constitue la vallée du Grésivaudan dans laquelle le Vorz se jette dans l'Isère à proximité de Grenoble.

1.3. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE :

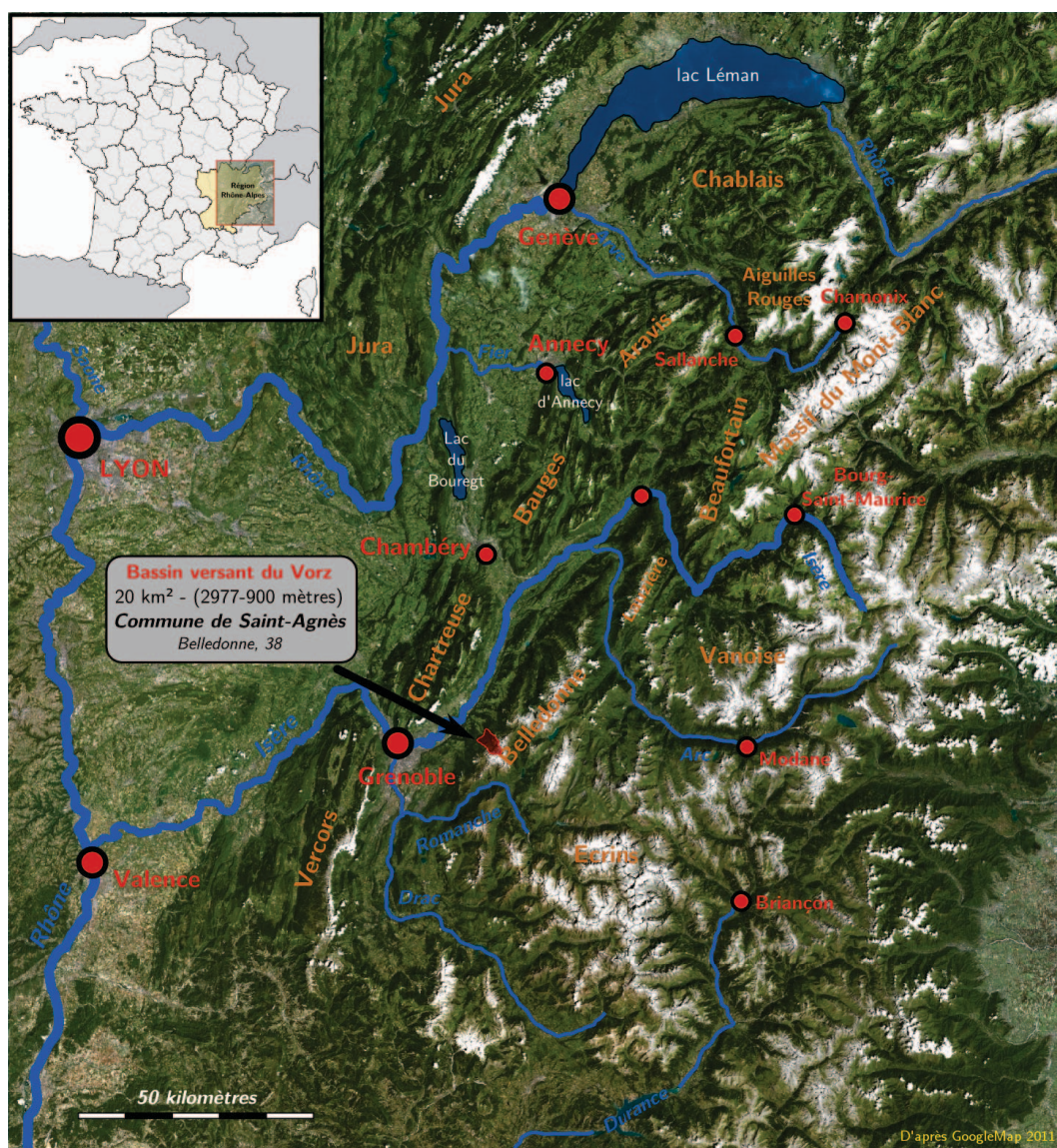


FIG. 1.10: Localisation du bassin versant du Vorz en Rhône-Alpes

1.3.1.3 Géographie locale : *Le Massif de Belledonne*

Le Massif de Belledonne forme le premier haut massif alpin faisant face aux dépressions venues de l'Atlantique. Situé dans la bordure occidentale du massif, le bassin versant du Vorz est dominé par le point culminant de la chaîne : le Grand Pic de Belledonne (2977 mètres), et sa confluence avec l'Isère est située dans la commune de Villard-Bonnot (225 mètres). Au niveau morphologique, on distingue plusieurs zones : la partie haute du massif étant séparée de la plaine par un "replat" aux environs de 800 à 1500 mètres, avant de plonger vers la vallée du Grésivaudan, à la hauteur des collines bordières de Belledonne. Plusieurs autres systèmes torrentiels drainent le massif, on en dénombre au moins 3 : le Doménon, la Combe de Lancey et le Crop-Laval, comme le montre la figure 1.11.

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

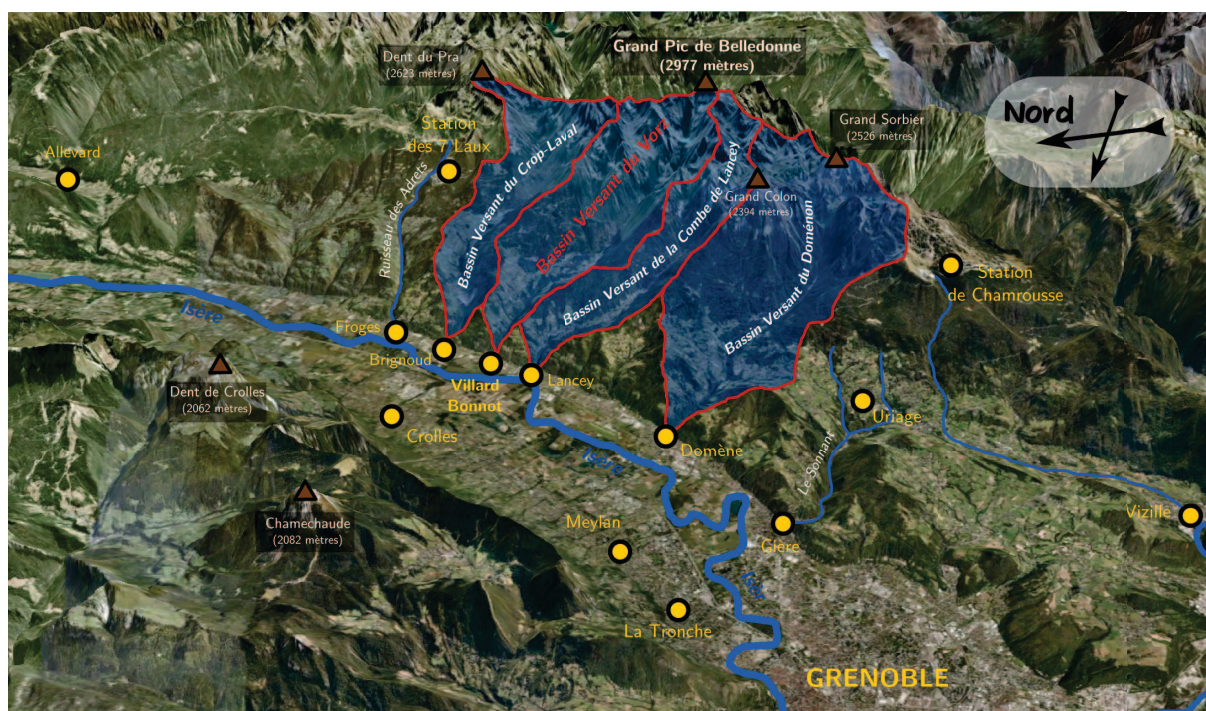


FIG. 1.11: Bassins versants principaux de la bordure ouest du massif de Belledonne

1.3.2 Bassin versant du Vorz (*Saint-Agnès, Belledonne, 38*)

Bien que le torrent du Vorz se jette dans l'Isère (Villard-Bonnot), dans la plaine du Grésivaudan, nous allons limiter le bassin d'étude à la zone amont du village touchée par la crue : Saint-Agnès (cf. figure 1.12). Ainsi, le bassin versant s'étendra de 2977 mètres (*Grand Pic*) à 760 mètres (*La Gorge*), sur une surface d'environ 18 km^2 . Dans les parties suivantes, les caractéristiques morphologiques et hydrologiques de ce bassin seront présentées plus en détails.

1.3. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE :



FIG. 1.12: Carte générale du bassin versant du Vorz

Section 1.4

Contexte Climatique & Hydrométéorologique :**1.4.1 Climatologie du Massif de Belledonne :**

Le bassin versant du Vorz est situé sur la bordure occidentale du Massif de Belledonne. Ainsi, il est exposé et particulièrement affecté par les perturbations provenant des régimes d'ouest (*Deroin, 2007, [30]* et *Gottardi, 2009, [47]*). Les cumuls pluviométriques résultant de cette position particulière peuvent ainsi être très importants, et, lors de la période hivernale donner des cumuls neigeux conséquents de plus de 3 à 6 mètres (*Villecroze, 2001, [120]*). Comme tous les massifs montagneux, le massif de Belledonne, mais également le petit bassin versant du Vorz (45km^2) sont soumis à de très grandes variations climatologiques spatiales et altitudinales. Lors de la crue de 2005, les précipitations relevées aux différentes stations du massifs ont mis en évidence la concentration de l'évènement pluvieux à des altitudes supérieures à 1500 mètres, où les précipitations ont pris un caractère cévenol (*Rapport Vorz, 2008, [1]*). En raison de l'absence de stations de mesure à haute altitude, les intensités de précipitations (entre 200 et 400 mm en 48h) ne peuvent qu'être estimées.

En conséquence, il ressort de ces premiers éléments qu'il est très difficile de quantifier la climatologie locale de ce bassin versant, en marge de l'essentiel des réseaux de mesures météorologiques. Cette quantification des conditions météorologiques sur le Vorz fera l'objet d'un développement complet dans les prochains chapitres. Cependant, nous pouvons compléter cette première analyse par une présentation rapide de la climatologie de la bordure occidentale du Massif de Belledonne.

1.4.1.1 Climat dans la Vallée du Grésivaudan :

Le climat de la région Grenobloise et du Grésivaudan est caractérisé par une influence océanique fortement contrebalancé par son environnement montagneux. Ainsi, Grenoble bénéficie d'un climat contrasté avec des amplitudes thermiques annuelles importantes de plus de 30°C (*Source de données, Station Météo-France de SaintMartin d'Hères, 1971-2000*). On y enregistre de grands froids en hiver (températures minimales moyennes de $-1,3^\circ\text{C}$ en Janvier) et de fortes températures en été (températures maximales moyennes de $27,9^\circ\text{C}$ en Juillet), parfois sur de longues durées (plus de 35°C plusieurs jours de suite en 2003, 2005, 2006, 2009, 2010). En ce qui concerne la pluviométrie, les premiers massifs alpins faisant office de barrières aux précipitations (notamment les régimes d'ouest qui sont majoritaires) intensifient les précipitations comparées à la la proche vallée du Rhône (environ 965 mm/an contre 770 en moyenne nationale). Malgré tout, cette météorologie très changeante sur la vallée du Grésivaudan lui confère des taux d'ensoleillements annuels très important (2020 h/an), proche de ceux des villes du sud de la France.

Le graphique ci-dessous (fig. 1.13) souligne la variabilité climatique saisonnière importante avec des été chauds et secs et des hivers froids et relativement humides. Les périodes pluvieuses sont concentrées sur l'automne et la fin du printemps, comme dans la plupart des climats à influence océanique. Ainsi, malgré sa localisation à basse altitude (220 mètres), la ville de Grenoble bénéficie d'un climat à forte influence "montagnarde", en particulier du fait de la présence de massifs importants (Belledonne, Chartreuse, Vercors) à sa périphérie.

1.4. CONTEXTE CLIMATIQUE & HYDROMÉTÉOROLOGIQUE :

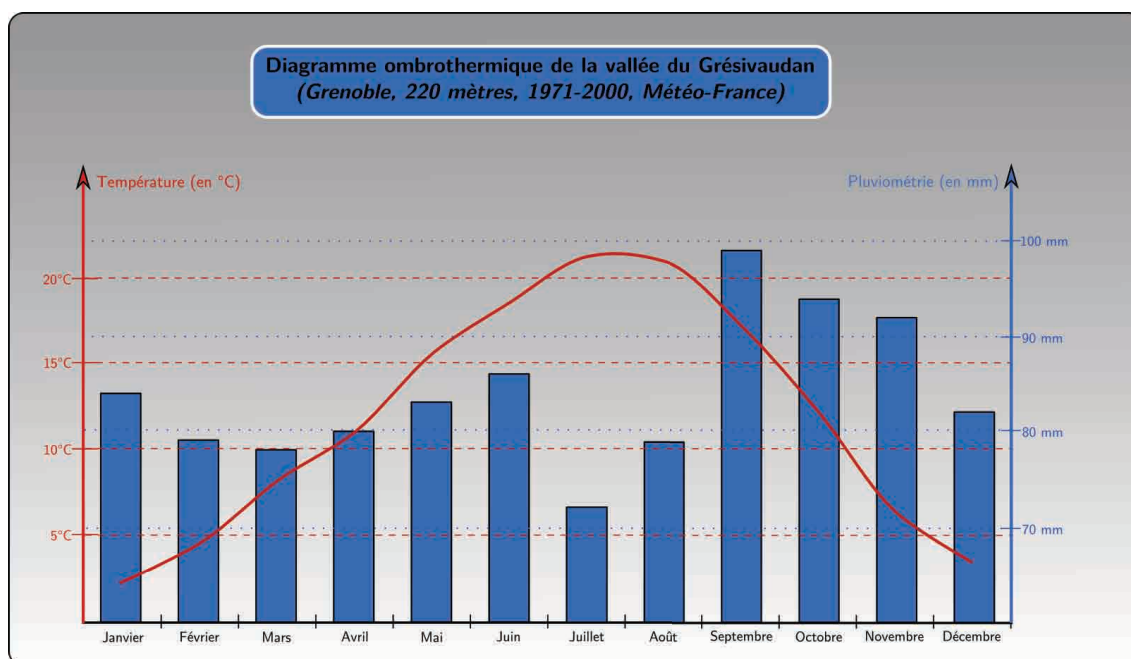


FIG. 1.13: Diagramme climatique de la ville de Grenoble entre 1971 et 2000

1.4.1.2 Climat sur les contreforts du massif de Belledonne :

L'analyse des données provenant des stations météorologiques locales du massif de Belledonne (Chamrousse, Le Versoud) permet de quantifier les caractéristiques climatiques de Belledonne (cf figure 1.14), et en particulier l'impact de l'altitude. Cependant, les données issues de ces stations n'ayant que peu de recul temporel (moins de 36 mois de données), on se contentera ici de n'étudier que des différences relatives entre stations, et, on se gardera de toute interprétation à long terme à partir de celles-ci.

La température moyenne à Chamrousse (1785 mètres) ces deux dernières années est de $5,4^{\circ}\text{C}$, contre $12,3^{\circ}\text{C}$ au Versoud (220 mètres), soit une différence de environ 7°C pour 1500 mètres. On notera également que cette différence est quasi constante tout au long de l'année. Il semble donc se dessiner un gradient thermique régional d'environ $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, légèrement plus faible que celui couramment utilisé en première approche (*Koscielny, 2006, [69]*). De même les précipitations sont affectées par des différences notables. En effet, si globalement le gradient est positif durant la saison estivale, il semble s'inverser durant l'hiver avec une quantité de précipitations plus importantes en plaine. Cependant, ces valeurs sont à relativiser du fait des forts cumuls de neige enregistrés à Chamrousse pouvant perturber la mesure des précipitations.

De manière générale, le massif de Belledonne jouit d'un climat montagnard avec une forte influence des régimes d'ouest. Cette particularité lui confère des conditions d'enneigement importantes, avec de forts cumuls pluviométriques comparés aux massifs plus internes et des températures relativement froides. Ainsi, ces conditions font du massif de Belledonne un des plus enneigés des Alpes françaises, avec un couvert nival présent relativement longtemps dans la saison.

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

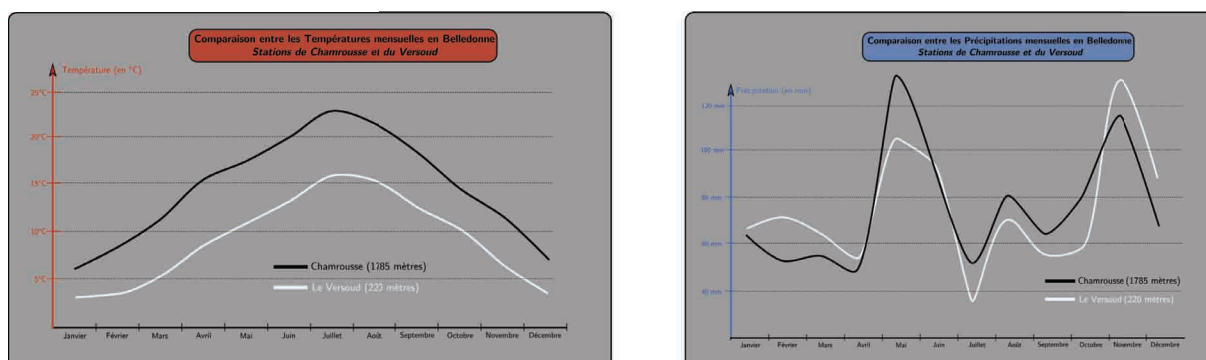


FIG. 1.14: Comparaison entre les stations du massif de Belledonne

1.4.2 Hydrologie régionale et locale :

1.4.2.1 Régimes hydrologiques :

Le Massif de Belledonne est drainé par un ensemble de torrents qui débouchent dans la vallée de l'Isère. Du fait de la quasi absence de glaciers actuels dans ce massif, mis à part celui de Freydane pour la partie sud, ces torrents ont pour la plupart un régime pluvio-nival, comme en témoigne le graphique suivant (fig. 1.15). Les débits les plus importants sont ceux de la fin du printemps et du début de l'été (Mai à Juillet). Ils correspondent à la fonte des neiges à des altitudes comprises entre 1500 et 3000 mètres. Les étiages quant à eux sont relativement forts et se produisent durant la période hivernale (Novembre à Mars). En conséquence, les ressources en eaux seront particulièrement limitées durant cette période, et il conviendra de les exploiter avec parcimonie.

Il n'existe aucune chronique de débits conséquente pour le torrent du Vorz. En revanche, on dispose de quelques données sur le torrent du Doménon (cf figure 1.15). Etant donné qu'il est le voisin direct du Vorz et que sa surface drainée, son orientation et son altitude sont sensiblement identiques, le comportement hydrologiques général du Vorz sera globalement comparable.

Au niveau régional, l'analyse des données de plusieurs autres cours d'eau permet de rendre compte des caractéristiques du Vorz et Doménon. Ainsi, si l'Isère possède un régime hydrologique annuel plus régulier, compte tenu de la taille du bassin versant drainé, celui-ci est à nuancer du fait du contrôle effectué par les installations hydroélectriques. Pour la Romanche, la composante glaciaire est clairement visible au mois d'Août, avec une baisse moins importante des débits que pour les autres cours d'eau. Dans le même temps, l'Eau d'Olle à un régime hydrologique proche de celui du Doménon, malgré sa présence dans la partie orientale du massif de Belledonne. Au final, le graphe suivant (fig. 1.16) met en évidence la position en tête de bassin versant du torrent du Vorz que nous allons étudier par la suite.

1.4.2.2 Caractéristiques des périodes de crues :

Au niveau régional, les périodes les plus à craindre quand au développement de crues sont essentiellement celles de la fonte des neiges (Avril-Mai), notamment sur l'Isère. Occasionnellement, des crues automnales peuvent se produire, notamment lors de forts épisodes pluvieux qui se répercutent sur des grands bassins versants (octobre 2000 pour l'Isère par exemple).

En ce qui concerne les torrents d'altitude cantonnés à des bassins versants plus limités, il

1.4. CONTEXTE CLIMATIQUE & HYDROMÉTÉOROLOGIQUE :

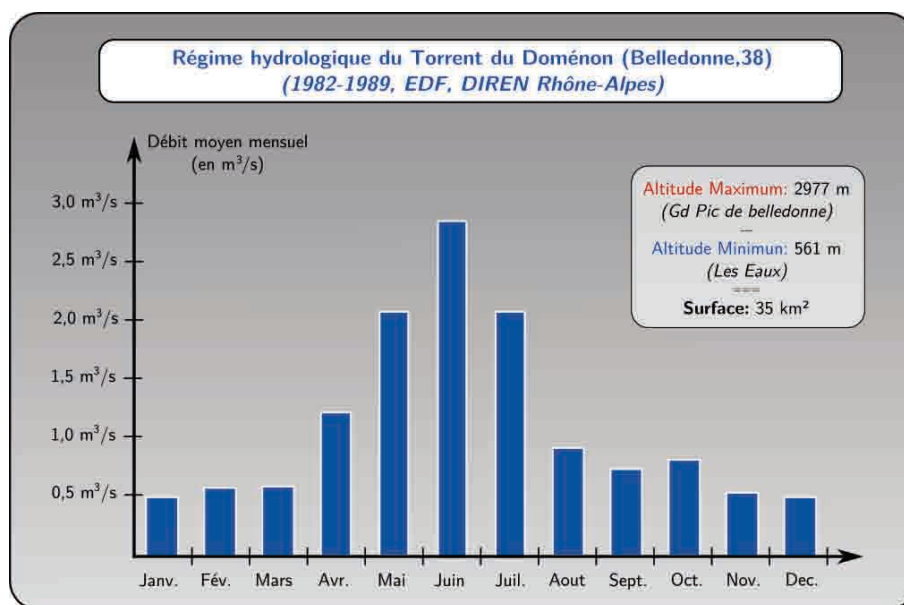


FIG. 1.15: Evolution du régime hydrologique sur le torrent du Doménon entre 1980 et 1990

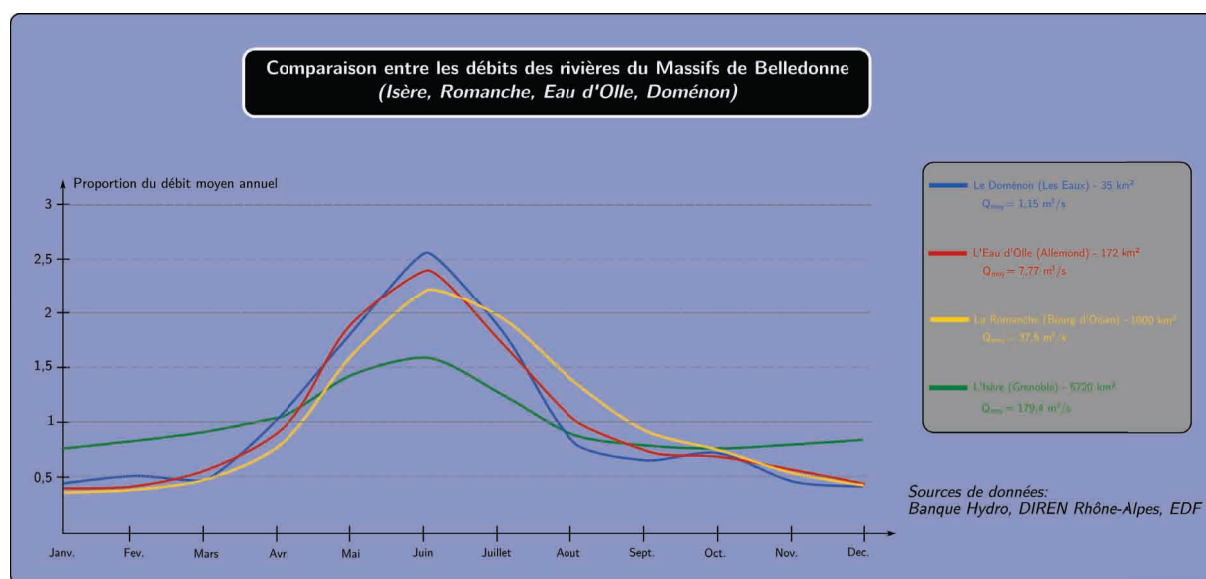


FIG. 1.16: Comparaison entre les débits de quelques rivières de la région du Massif de Belledonne

semble qu'ils soient particulièrement sensibles à des épisodes de type orageux durant les mois d'été (Juillet, Août, Septembre). En effet, il semblerait que la période printannière, malgré de forts débits dans les cours d'eau ne soit pas la plus sujette à des épisodes orageux forts et intenses, de même que la période automnale. Ainsi il semble que même si de forts débits peuvent être observés durant ces saisons, la période critique en terme de gestion des crues sur les petits bassins versants de la partie occidentale des massifs alpins est restreinte aux mois de Juillet à Septembre. C'est d'ailleurs dans cette période que sont enregistrées la plupart des crues historiques. De plus, la fonte des neiges, même si elle apporte de forts débits ne semble quasiment jamais responsable du développement d'épisodes torrentiels forts sur ces versants,

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

qui nécessitent des conditions très particulières avec des précipitations intenses sur de faibles durées.

1.4.3 Evolution climatique :

L'évolution climatique actuelle conduit à penser qu'à moyen terme, des changements climatiques observables et mesurables vont se développer sur la planète. Cependant, ces changements ne seront pas uniformes et certaines zones telles que les zones de montagnes apparaissent plus sensibles aux changements que d'autres ([Benniston, 2005, \[12\]](#) et [Rapport programme ClimAlpTour, 2010, \[96\]](#)). Ainsi, il est envisagé une hausse des températures de l'ordre de $1,5^{\circ}\text{C}$ pour l'horizon 2050 ([OCCC, 2007, \[89\]](#) ; [OCDE, 2007, \[90\]](#) ; [OFEV, 2007, \[91\]](#)). Bien que ce ne soit là que des prédictions basées sur des modèles complexes, il serait préjudiciable, dans le cadre d'une étude menée sur ces zones sensibles et visant à améliorer la prévision des crues et la gestion des ressources en eau, de ne pas prendre en compte cette éventualité d'évolution future.

Créé en 1988, le GIEC, Groupement Intergouvernemental pour l'Evolution du Climat (en anglais Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), a mis en place un certain nombre de scénarios économiques, démographiques,... permettant de modéliser l'évolution du climat en fonction des évolutions sociétales futures. Dans le cadre de ce travail, nous considérerons le cas échéant le scénario d'évolution le plus probable, c'est-à-dire un scénario considérant un monde globalisé avec une croissance économique rapide (A1, ici A1b). L'ensemble de ces simulations sont menées à grande échelle, puis, dans un second temps, il est possible de les régionaliser ([Rapport European Environment Agency, 2009, \[63\]](#) ; [www.eea.europa.eu](#)).

1.4.3.1 Evolution des précipitations et températures :

Les cartes suivantes (cf fig.1.17 ; [Lautenschlager, 2008, \[72\]](#)) montrent l'évolution envisagée des températures et précipitations sur la zone alpine. On ne retiendra ici que des ordres de grandeurs, sans les quantifier précisément. A un niveau plus local, on pourra retenir quelques valeurs remarquables issues du [Livre Blanc du climat \(Conseil général de Savoie, Dir. Delannoy.J-J ; \[29\]\)](#) :

- A long terme, les températures devraient augmenter de manières différentes en fonction des périodes de l'année. Ainsi, les hausses maximum devraient avoir lieu pour les températures estivales ($+1,5^{\circ}\text{C}$ d'ici 2030) et hivernales ($+1^{\circ}\text{C}$ d'ici 2030), maximisant ainsi la fonte des glaciers en été, tout en ne favorisant pas l'alimentation en hiver du fait de la hausse de l'isotherme 0°C (augmentation de 300 à 400 mètres d'ici 2050). Ce phénomène aura un impact direct sur les ressources en eau en montagne, puisque le stockage sous forme solide sera moins important, et les débits des rivières ne seront plus tamponnés par la neige et présenteront un débit plus constant au cours de l'année. Dans le même temps, les périodes de déclenchement potentiel des crues risquent de s'étendre, puisque les conditions estivales actuelles dureront plus longtemps.
- L'évolution des précipitations viendra elle aussi favoriser la disparition des glaciers et neiges, puisque les étés et automnes seront plus secs (-20% de la pluviométrie en 2050). Cependant, les précipitations devraient augmenter légèrement durant l'hiver et le printemps ($+10\%$ de pluviométrie en 2050). Ce mécanisme pourrait permettre de pondérer quelque peu les conséquences du manque de neige sur les débits printanniers.

1.4. CONTEXTE CLIMATIQUE & HYDROMÉTÉOROLOGIQUE :

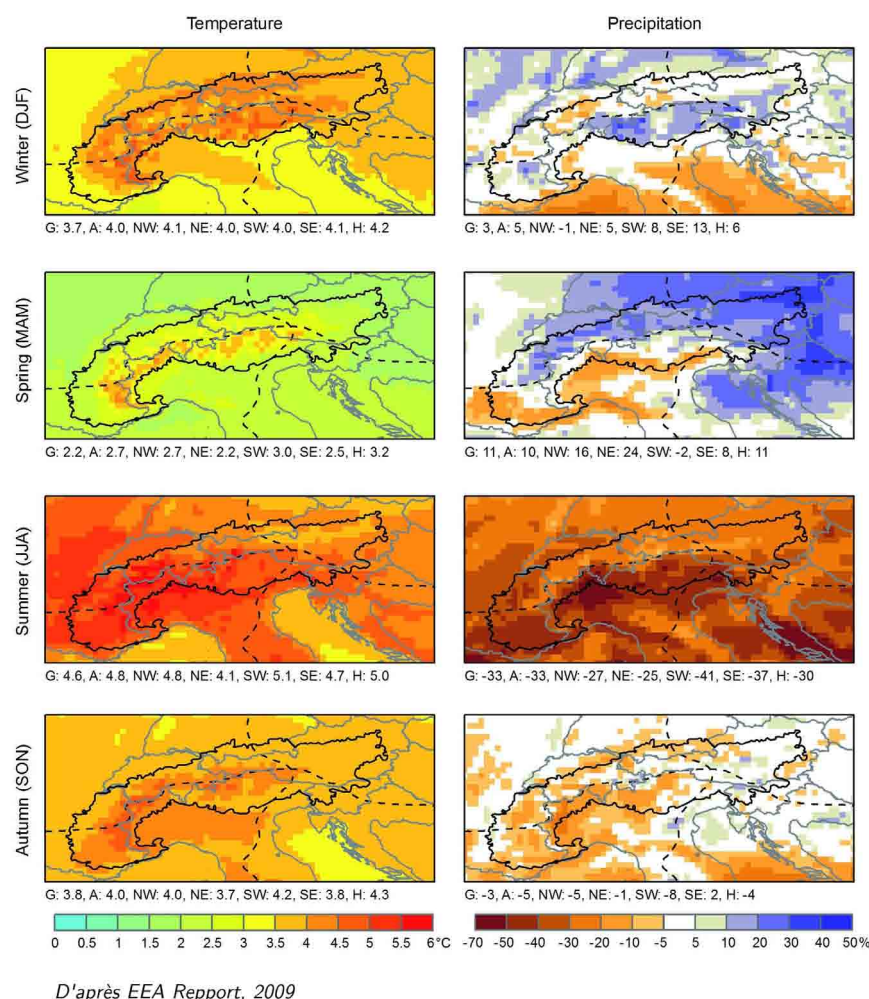


FIG. 1.17: Evolution des précipitations et températures sur le massif alpin pour la fin du siècle

De manière générale, il faut s'attendre à un climat plus chaud et légèrement plus sec en été, tandis que pendant l'hiver et le printemps, de fortes précipitations resteront possibles. Ainsi, la problématique des crues devrait se poser plus fortement, de même que la gestion des ressources en eau qui devra s'adapter à ces évolutions et notamment la disparition progressive des stocks de neige et glace due à la remontée de l'isotherme 0°C .

1.4.3.2 Conséquences sur l'hydrologie : Neige et Débits :

Les cartes suivantes (fig. 1.18 ; [Lautenschlager, 2008, \[72\]](#)) soulignent les conséquences possibles du réchauffement climatique sur les composantes essentielles du cycle hydrologique en montagne : la neige et les débits des torrents. Ainsi, comme on peut s'y attendre, le couvert neigeux devrait diminuer de 20 à 40%, conséquence directe de la hausse des isothermes sur les chutes de neige. Dans le même temps, les fortes températures viendront faire fondre l'eau stockée sous forme de glace et de neige permanente des hauts versants, qui gonflera les débits des différents torrents. De cette manière, on peut s'attendre à des hausses substantielles des débits des cours d'eau de montagne durant cette évolution.

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

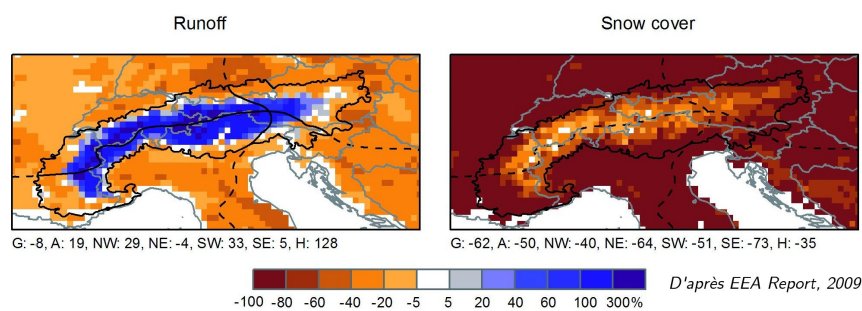


FIG. 1.18: Impact probable du changement climatique sur l'enneigement et les débits des cours d'eau d'ici la fin du siècle

Section 1.5

Contexte Géologique & Géomorphologique :

Lorsque l'on modélise l'hydrologie d'un versant, plusieurs paramètres autres que la climatologie doivent être pris en compte. En effet, de nombreux autres facteurs entre en jeu dans le cycle de l'eau sur le versant, notamment sur le stockage, le routage, et le comportement hydraulique des écoulements. On considérera donc d'abord la géologie du versant, qui joue un rôle en fournissant ou non des infiltrations, des circulations d'eaux souterraines ou encore des résurgences d'eau à la surface du bassin; différents paramètres qui peuvent modifier considérablement les bilans hydrologiques. Dans un second temps, la géomorphologie joue un rôle majeur dans les écoulements à des échelles parfois très courtes (journalière à horaires), en intervenant sur la pente du torrent, la présence ou non de formations superficielles ou encore l'imperméabilité. Enfin, l'étude du sol et de l'enveloppe hypodermique des deux éléments précédents permet d'appréhender au mieux les conditions d'infiltrations et d'arrivées d'eau dans le versant du Vorz.

1.5.1 Contexte géologique régional et local :

Le Massif de Belledonne appartient aux massifs cristallins externes des Alpes, constitués essentiellement de roches métamorphiques et de granites (www.geol-alp.com, Juin 2011). Ce massif est composé de plusieurs unités différentes orientées sud-ouest/nord-est et séparées par l'accident médian de Belledonne :

1. Le rameau interne de Belledonne, avec l'unité supérieure composée de roches métamorphiques et cristallines (ophiolites, gneiss et amphiboles), résistantes à l'érosion et conférant au bassin son caractère escarpé dans sa partie sommitale.
2. Le rameau externe de Belledonne, formé de terrains sédimentaires (marnes, calcaires,...), à l'origine de relief modéré dans la partie basse du bassin.
3. Les collines bordières situées au flanc de la vallée du Grésivaudan constituent les contreforts du massif composés de marnes et calcaires argileux.

Au niveau du Vorz, l'ensemble des terrains décrits précédemment sont recouverts par des formations superficielles abondantes, signe d'une morphogenèse dynamique (cf. fig.1.19). La coupe annexée à la figure 1.19 met en évidence la présence de l'accident médian, qui sépare en deux le massif, et dont la présence s'observe également dans la forme du paysage, puisque c'est à cet endroit que débute le "replat" des Balcons de Belledonne au niveau de La Gorge. Ainsi, la géologie joue ici un rôle évident. En effet, les gorges étroites et profondément inscisées avec une forte capacité d'érosion correspondent aux assises les plus résistantes du massif impliquant un profil hydrographique tendu. Les "replats" correspondent quant à eux à des assises moins résistantes et plus facilement érodables. Cette morphologie entraîne au niveau des torrents une alternance d'emballlement et de perte d'énergie de transport, et donc, un dépôt de la charge sédimentaire, à l'image de ce qui s'est passé lors de la crue de 2005.

De manière synthétique (*Carte géologique de Domène*, [6] et *Carte géologique de Vizille*, [5]), on peut donc dire que la partie haute du bassin versant est composée d'un ensemble de roches très anciennes (jusqu'à 400 Ma), fortement tectonisées durant les orogènes successifs (Hercynien, Alpin). Ces orogènes ont entraîné la mise en place de roches très différentes, et à

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

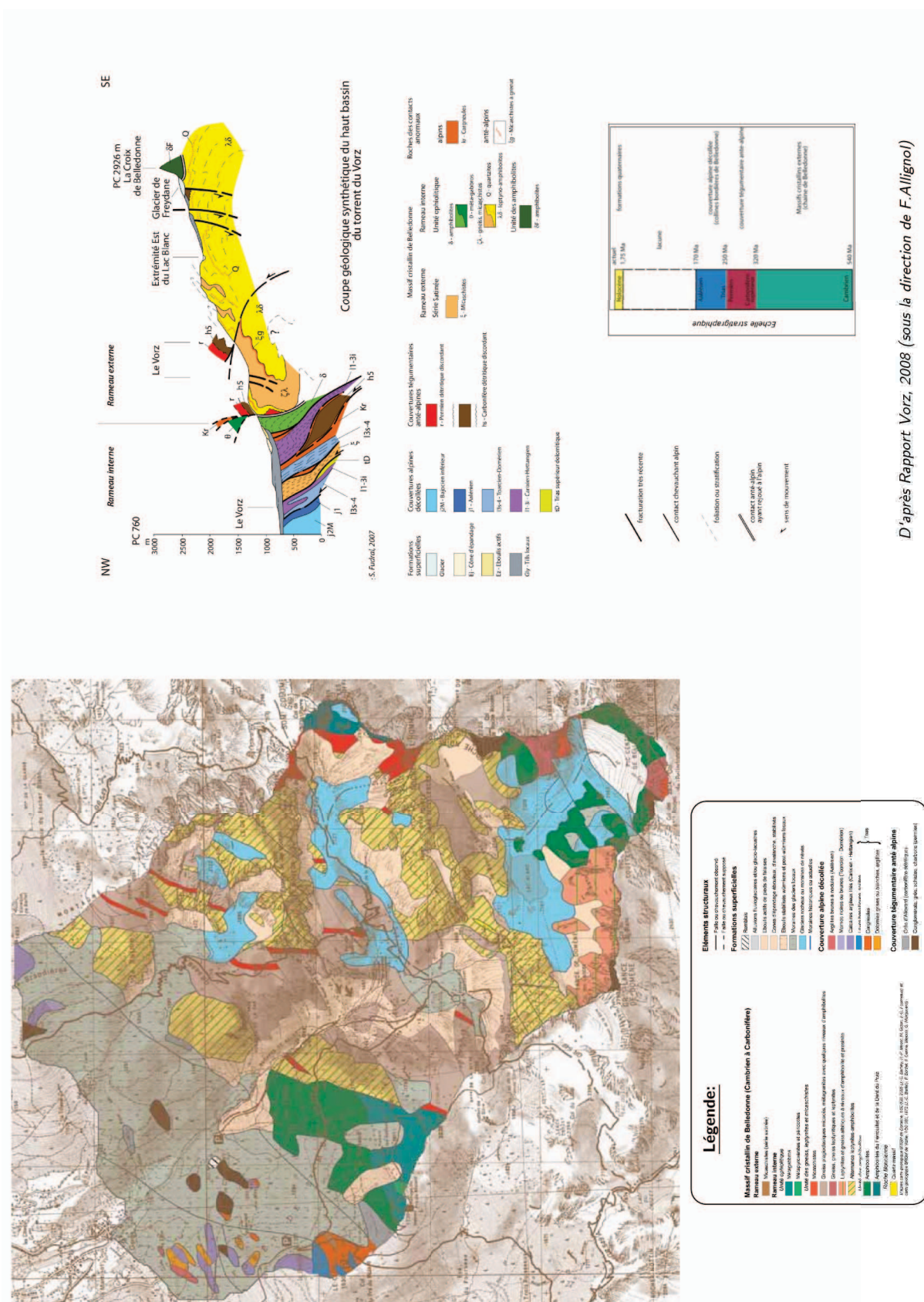


FIG. 1.19: Eléments de géologie sur le bassin versant du Vorz

1.5. CONTEXTE GÉOLOGIQUE & GÉOMORPHOLOGIQUE :

composition minérale complexe, découpées par de nombreuses failles, fractures et chevauchements. La partie sommitale est essentiellement composée de roches métamorphiques (gneiss, amphibolites) totalement imperméables aux écoulements, à part en présence de fracturation. De fait, en quelques points du massif, dans les zones fortement fracturées, on peut observer des infiltrations ponctuelles dans le substratum, mais cela de manière très limitée au regard de la quantité d'eau présente sur le versant.

1.5.2 Géomorphologie du bassin versant du Vorz :

L'ensemble des formations géologiques ont été fortement affectées par la dynamique quaternaire et en particulier par les glaciers qui s'y sont développés. Cependant, aujourd'hui, la majorité des dynamiques de versant se produisent dans la partie haute du bassin, la partie basse étant recouverte d'un épais couvert végétal qui favorise leur stabilisation. Ainsi, on s'intéressera ici essentiellement à la zone supérieure du Vorz dont les formations superficielles ont été cartographiées lors du programme Vorz ([Rapport Vorz, 2008](#), [1]) et sont présentées dans la figure 1.20.

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

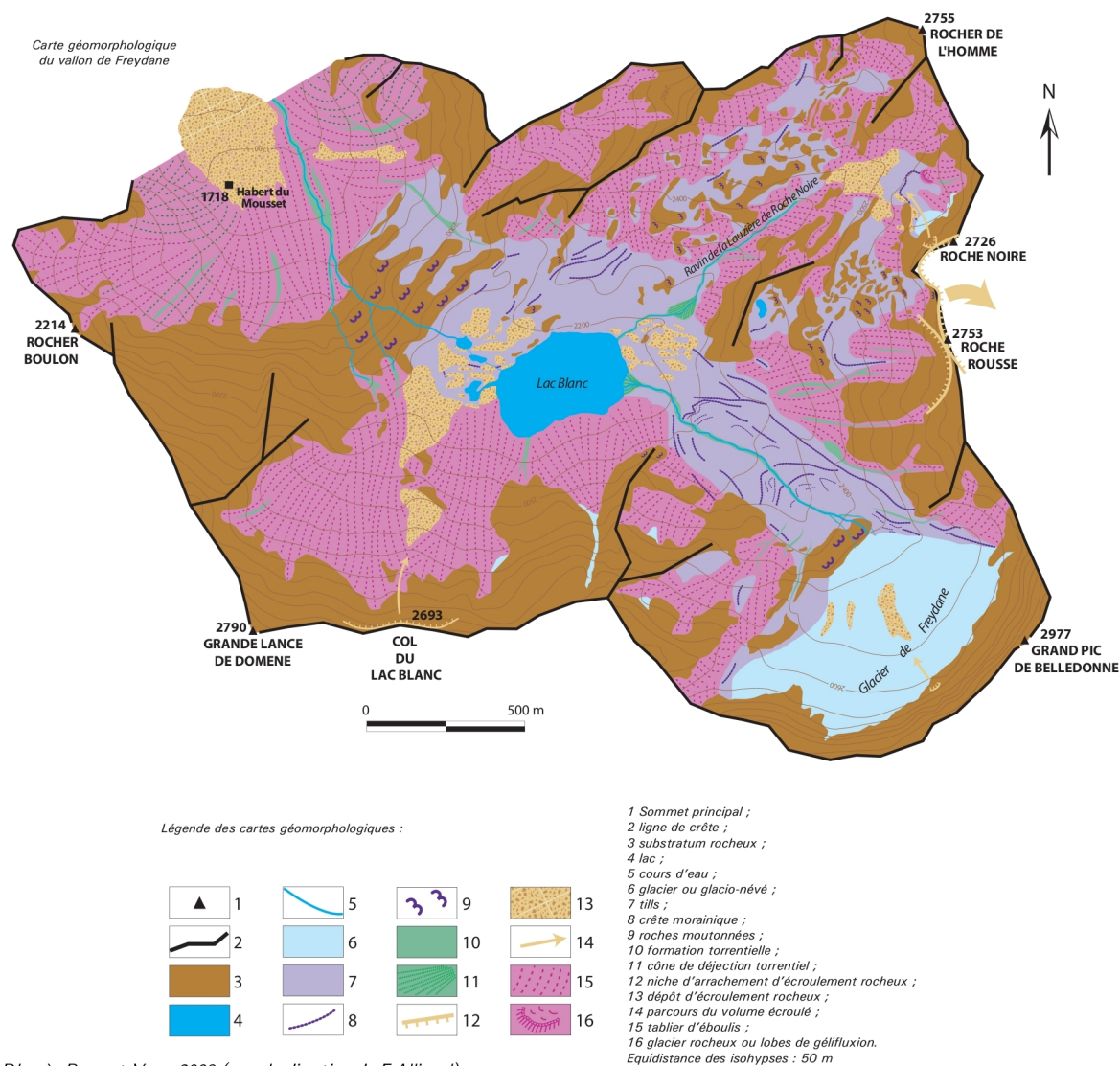


FIG. 1.20: Cartographie des formations superficielles dans la partie supérieure du bassin versant

Sur cette carte on constate que les moraines (tills) constituent l'essentiel du matériel disponible dans la partie haute de bassin et constituent une source de matériaux quasi-inépuisable pour les crues torrentielles. Ces matériaux morainiques sont accompagnés de dépôts de versant (éboulis, dépôts d'éroulements rocheux,...) conséquents, notamment au pied des principaux points culminants (3 pics de Belledonne, Grande Lance de Domaine,...). Le cours du torrent est fortement affecté par la géomorphologie locale, et, moyennant des précipitations conséquentes, il est capable de transporter des quantités considérables de matériaux. Ainsi, le potentiel de dangerosité du torrent dépend essentiellement des conditions météorologiques locales, mais également de la géomorphologie et de la nature des sols. Ces différents éléments sont à prendre en compte dans le cadre de modélisations hydrologiques.

1.5. CONTEXTE GÉOLOGIQUE & GÉOMORPHOLOGIQUE :

1.5.3 Occupation du sol et pédologie :

L'activité humaine sur le bassin versant du Vorz est limitée. En effet, mis à part quelques hectares de pâtures et l'emprise du village de Saint-Agnès, le bassin est globalement resté dans son état naturel. On y distingue actuellement trois zones : la zone boisée, les surfaces de landes (végétation de l'étage alpin), puis, dans la partie haute, les "sols nus". Cette particularité du versant a une conséquence directe sur la typologie des sols, ainsi que sur les caractéristiques d'écoulements. Dans la zone boisée, la capacité d'infiltration est relativement importante, avec la présence d'un sol conséquent et la possibilité d'écoulements hypodermiques et de stockage par infiltration et rétention en cas de forts épisodes pluvieux. Dans les zones de landes, les épaisseurs de sols sont plus limitées et les écoulements sont de ce fait moins tamponnés. Au contraire, dans la zone supérieure du bassin, le sol est quasi inexistant, et seules les moraines et éboulis recouvrent le substratum rocheux. En conséquence, les écoulements sont quasi-directs et instantanés, avec des temps de concentration relativement courts et des capacités de transports importantes (pente et matériaux disponibles).

A partir de cette première analyse, la zone qui apparaît la plus sensible en terme de crue torrentielles et de génération d'épisodes violents, est la partie haute du bassin versant, et ce, notamment en raison de l'absence de sol, et d'effet tampon sur une surface importante dans une zone fortement érodable (pente, matériel,...).

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

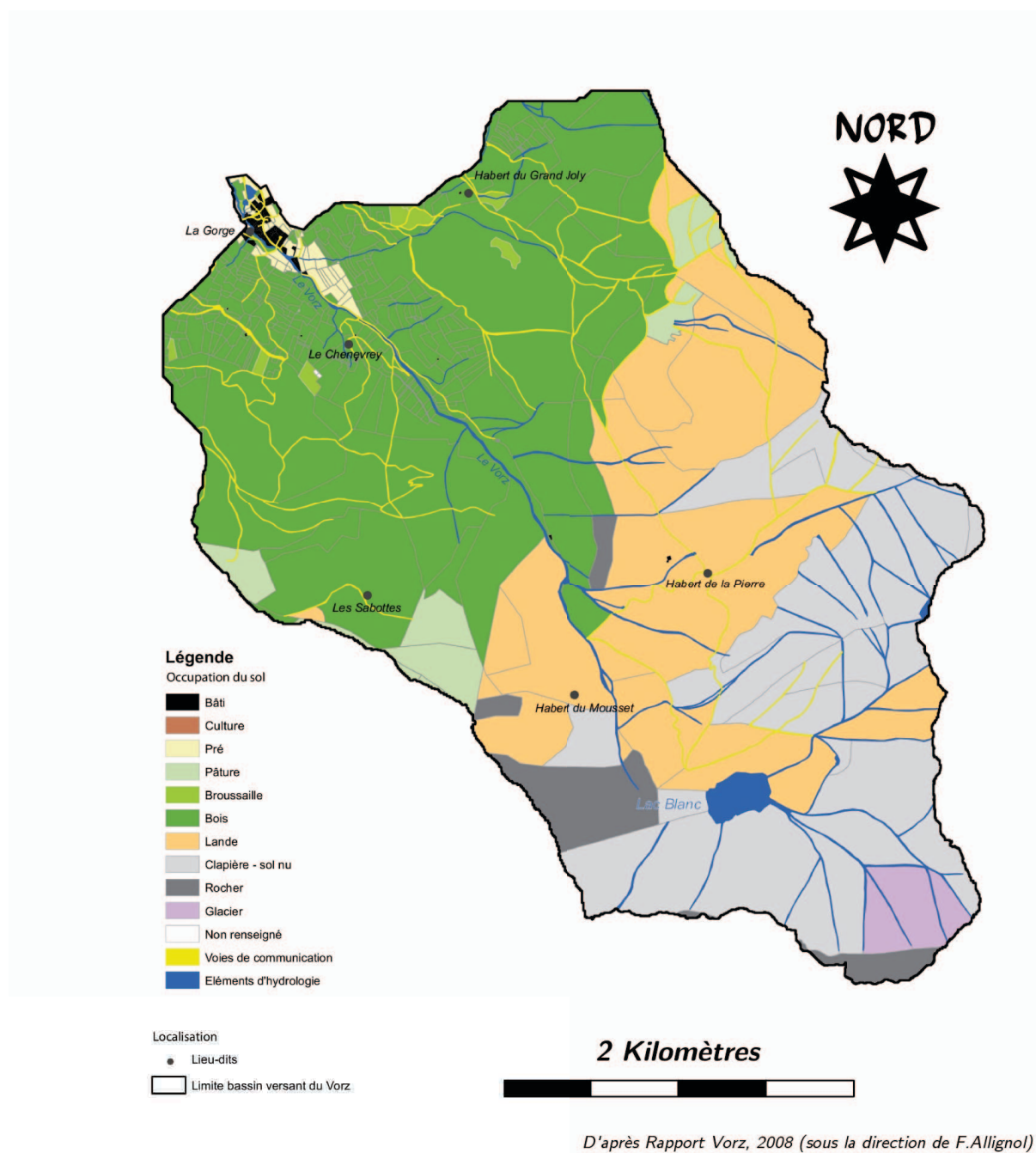


FIG. 1.21: Occupation des sols sur la commune de Saint-Agnès et le bassin versant du Vorz

Hydrologie sur le Vorz :

1.6.1 Les grandes unités hydrologiques :

Conformément à ce que nous avons présenté en ce qui concerne la crue, ainsi que la géologie et géomorphologie du versant, nous avons réalisé un découpage en trois sous-bassins hydrologiques distincts :

1. Bassin Versant du Lac Blanc
2. Bassin Versant du Pleynet
3. Bassin Versant de La Gorge

Le bassin versant du Lac Blanc constitue la partie supérieure du bassin versant dans laquelle de forts épisodes pluvieux se sont produits lors de la crue de 2005. Ce caractère météorologique spécifique s'ajoute aux conditions morphologiques de fortes pentes, aux grandes quantités de matériaux disponibles sans aucun sol capable de tamponner le système, qui font de cette zone un élément clé du fonctionnement hydrologique du versant. Cependant, la présence du lac vient limiter cette influence sur le fonctionnement général et constitue un élément suffisant pour créer une zone hydrologique unique.

Dans la partie médiane du versant, on conserve de fortes pentes, mais la présence de sol et de végétation y est plus conséquente et influence le comportement hydrologique qui sera différent de celui de la partie supérieure. De plus, ce versant voit son exutoire situé juste à l'entrée de la gorge dans laquelle les laves torrentielles se sont formées en 2005. De fait, il était logique de considérer ce versant comme une unité indépendante et d'en analyser le comportement hydrologique à son exutoire. La présence de la prise d'eau du Pleynet permet également de pouvoir avoir un suivi hydrologique régulier, comme on le verra par la suite.

Enfin, le dernier bassin versant constitue la surface totale drainée à la hauteur du hameau de La Gorge, qui a été particulièrement touché lors de la crue de 2005. Dans ce bassin, on ajoute la partie boisée du versant, capable potentiellement de limiter les écoulements lors des crues, et, on étudiera sur ce dernier les effets du fonctionnement hydrologique en période de crue.

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

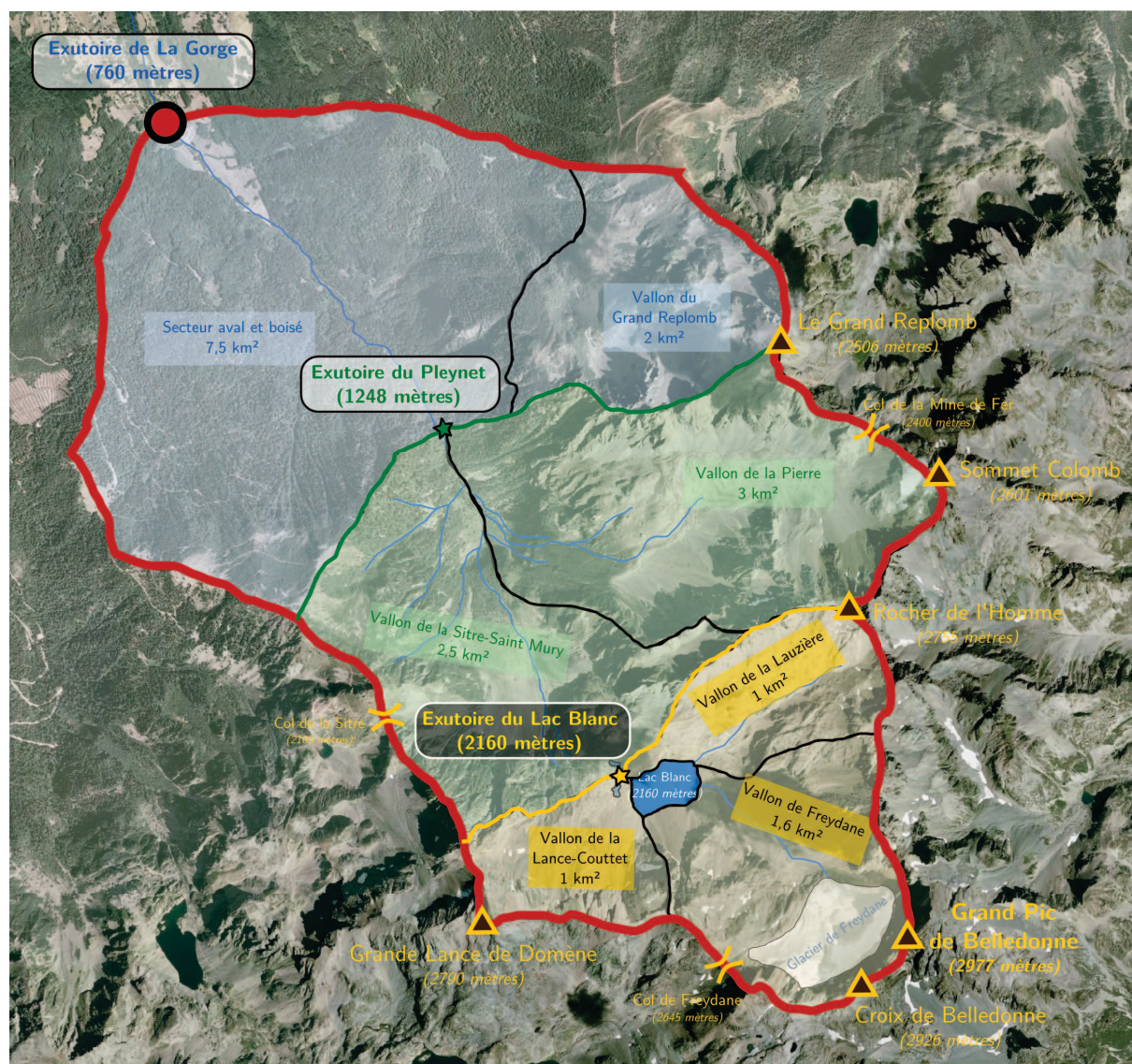


FIG. 1.22: Carte des sous-bassins versants hydrologiques du Vorz

1.6.2 Ressources en eaux :

On trouve un grand nombre de sources sur le bassin versant du Vorz (cf figure 1.23), globalement regroupées en 3 catégories.

Dans la partie haute, du versant (Lac Blanc et supérieur), les sources principales sont celles du Glacier de Freydane (~ 100 l/s), ainsi que celle du vallon de la Lauzière (5 à 10 l/s). Ces deux sources sont alimentées pour une petite partie par l'infiltration sur les sommets, mais surtout, par la fonte du glacier et des névés permanents dans les parties supérieures du bassin.

Dans la partie médiane, l'essentiel des sources se trouve sous forme de résurgences au pied des falaises du Mousset et du Boulon, par un ensemble de petites cascades dont les débits avoisinent les quelques litres à 50 l/s (Grande Lance de Domène). On notera également dans cette partie les sources de la partie supérieure du Vallon de la Pierre (10-20 l/s), alimentant les torrents au voisinage du refuge Jean-Collet, et dont la présence en pied de pente témoigne d'une infiltration potentielle sur les sommets alentours.

1.6. HYDROLOGIE SUR LE VORZ :

Enfin, la partie terminale du bassin est marquée par un grand nombre de sources, notamment sur les versants bordant le Vorz, dont le débit reste malgré tout limité (5 à 10 l/s). Le nombre de ces sources témoigne du potentiel d'infiltration plus important de cette zone, avec la présence de forêt, de couvert végétal et de sols plus conséquents que dans les parties hautes du versant.

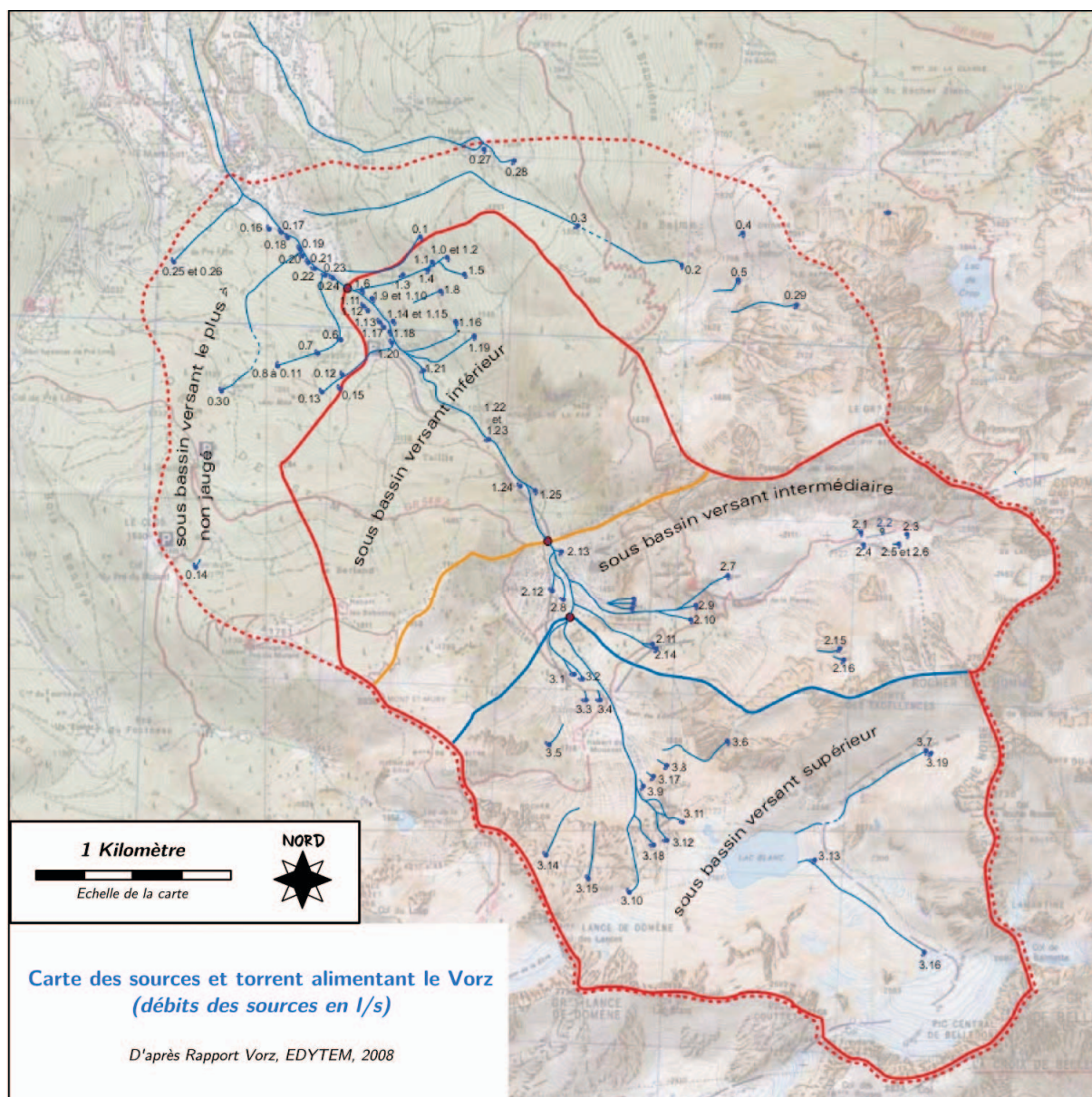


FIG. 1.23: Cartes des sources et cours d'eau sur le Vorz

1.6.3 Caractéristiques hydrologiques :

La figure 1.24 met en évidence les caractéristiques hydromorphologiques du bassin. En effet, outre le système hydrographique de surface, on observe la présence d'aquifères poreux de tailles limitées mais permettant l'alimentation des nombreuses petites sources du versant. La présence de ces aquifères est majoritairement due aux formations superficielles présentes sur

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

le terrain, comme par exemple dans le vallon de la Pierre, essentiellement composé d'éboulis et de moraines (latérales en particulier).

Les sources de la partie médiane semblent quant à elles en relation avec des aquifères fissurés. Cela se traduit en pied de pente par la présence de sources, à la hauteur de zones de contacts, où leur circulation souterraine se termine.

Dans la partie basse du bassin versant, la concentration de sources observées marque le pied d'aquifères poreux constituant l'essentiel des versant boisés du Vorz, et qui, lorsqu'il rencontrent une couche imperméable "relâchent" l'eau qui s'est infiltrée sous le couvert forestier.

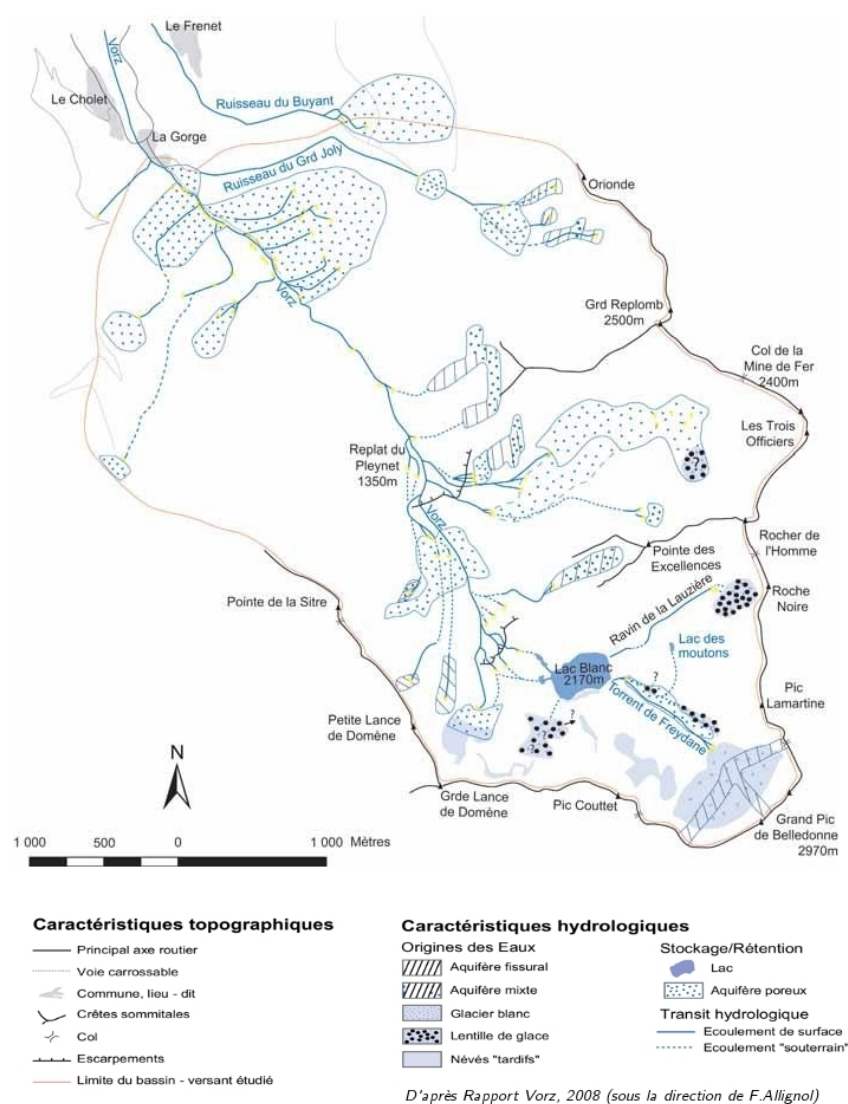


FIG. 1.24: Géomorphologie et hydrologie sur le Vorz, deux caractéristiques liées

L'ensemble de ces caractéristiques hydromorphologiques confèrent au bassin une activité torrentielle propre. Celle-ci se manifeste par des périodes de vulnérabilité, des intensités et des fréquences spécifiques, qui peuvent être déterminées par l'analyse des événements passés. Pour cela, nous allons maintenant étudier les crues remarquables par l'intermédiaire des archives historiques et naturelles disponibles pour le torrent du Vorz.

Crues historiques :

1.7.1 Archives sédimentaires : *Historique des crues à long terme*

Il n'existe pas d'enregistrements d'archives au delà de 250 ans pour le torrent du Vorz. Reconstituer l'historique des crues majeures sur le versant devient donc une tâche impossible à réaliser, sauf à utiliser des moyens d'investigations indirects. Le bassin versant du Vorz possède une particularité remarquable : Le Lac Blanc. Ce lac positionné au front du glacier de Freydane joue, depuis le retrait du glacier après le petit âge glaciaire, le rôle de réceptacle pour l'ensemble des éléments chariés par le torrent venant sédimenter dans le lac au cours du temps. Les crues affectant directement les quantités de sédiments transportés, les étudier permet de reconstituer les événements importants s'étant produits sur le versant. Ainsi, moyennant un carottage de la colonne de sédiment, et une datation des différents niveaux de celle-ci, il est possible de reconstituer la chronique de remplissage du lac et par cet intermédiaire des crues. Ce travail a été réalisé par l'équipe de sédimentologie lacustre du laboratoire EDYTEM.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans la figure suivante (fig. 1.25) et montrent une évolution de la fréquence et de l'intensité des crues au cours du 20^{ème} siècle, et plus particulièrement ces trente dernières années. En effet, ces dernières décennies qui sont les plus chaudes du siècle, sont marquées par une intensité maximale des crues, et les deux crues les plus intenses sont enregistrées durant cette période. Dans le même temps, on observe une diminution de leur fréquence. La quantité de sédiments étant considérée comme constante, puisque la disponibilité du matériel est extrêmement importante ("ressources illimitées"), les conditions morphologiques ne changent pas et ne peuvent en aucun cas être considérées comme la source d'apport substantielle de sédiment. En conséquence, il semble plus probable en l'état actuel des connaissances de considérer que l'évolution actuelle des phénomènes de crues tend vers une diminution de leur fréquence mais une augmentation de leur intensité.

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

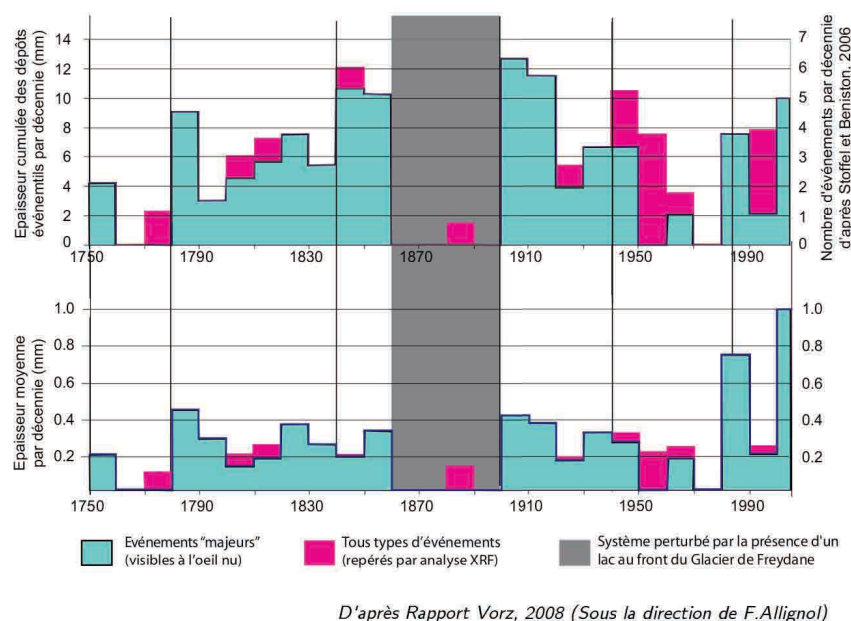


FIG. 1.25: Recherche des crues dans les archives sédimentaires

1.7.2 Archives historiques : *Historique des crues à court et moyen terme*

Les archives historiques récentes sont une source fiable de données, mais malheureusement pas au-delà de 2 à 3 siècles (*cf tableaux 1.2 et 1.3, d'après Rapport Vorz, 2008*). Les archives communales et départementales sur le Vorz ont été étudiées et permettent de remonter jusqu'au 18^{ème} siècle environ (1740). Leur analyse met en évidence une récurrence du phénomène de crues sur le versant du Vorz, bien que la mémoire humaine ait tendance à l'oublier. Au total, près de 20 événements majeurs sont recensés tout au long de la période couverte par les archives. Dans le détail, il apparaît que les périodes les plus propices à une réaction catastrophique du bassin versant soient : la fin du Petit Age Glaciaire (1850), l'épisode climatique chaud et humide des années 1930-1940 et le réchauffement actuel.

Ces données historiques viennent confirmer les conclusions obtenues à partir des archives naturelles, à savoir que les conditions de réchauffement climatique tendent à accroître l'intensité des crues et des phénomènes météorologiques intenses sur les petit bassins versants de montagne tel que celui du Vorz.

1.7. CRUES HISTORIQUES :

Torrent	Date	Dégâts	Lieu des dégâts
Isère	Décembre 1740	Dégradations importantes et durables de prés	Mas du Mayand à Lumbin
Vorz	Novembre 1748	Destruction d'un canal	Bas de Ste-Agnès
Ruisseau du Bernin	Fin Décembre 1759 Début Janvier 1760	Comblement d'un canal	Bernin, du pont jusqu'au chemin allant aux Hayes
Manival	Vers 1783	« irrutions » fréquentes	Crolles
Vorz	1815 à 1831	Dégâts fréquents sur les chemins	Plaine de l'Isère
Vorz	Septembre 1831	Erosion de berges Submersion de 100 ha de terrain Destruction des digues	Plaine de l'Isère
Lancey	Septembre 1831	Erosion des berges Exhaussement du lit	Plaine de l'Isère
Vorz	31 juillet et 2-3 août 1851	Destruction de tous les ponts entre Ste-Agnès et St-Mury-Monteymont. Comblement du pont de la Bouillas Une partie du chemin du Carré emportée	De la Gorge à la plaine de l'Isère
Vorz	Début 1852	Interruption de la circulation	Plaine de l'Isère Villard-Bonnot
Vorz	10 au 20 août 1852	Destruction de tous les ponts entre Ste-Agnès et St-Mury-Monteymont	De la Gorge à la plaine de l'Isère
Brignoud	29 au 31 mai 1856	Dégâts sur les chemins	Plaine de l'Isère ; communes de St-Ismiez, St-Nazaire, la Terrasse, la Ferrière, Laval et Domène
Froges	18 janvier 1875	Brèche sur la berge	En amont de Froges
Froges	Juillet 18752	Brèche sur les berges, crue extraordinaire, destruction d'un mur de soutènement	Froges, haut de la commune
Froges	21 Juillet 1882	Destruction d'un bâtiment	Rive gauche à Froges

TAB. 1.2: Crues du Vorz enregistrées dans les archives historiques

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

Torrent	Date	Dégâts	Lieu des dégâts
Vorz	1912	Débordement	Villard-Bonnot
Lancey	15 Juillet 1922	Comblement du lit sur 300 m de longueur. Le pont du chemin de fer de Grenoble à Montmélian fut presque totalement bouché. Comblement du canal d'assainissement de Tencin à Lancey avec pour conséquence l'inondation de la plaine.	Plaine de l'Isère
Vorz	24 Septembre 1924	Exhaussement et comblement du lit Destruction de digues dont une brèche de 39 m de longueur dans celles de la rive gauche	Plaine de l'Isère
Vorz	14-15 juillet 1933	Inondation Brèche dans la digue rive gauche à 300 m environ en amont du chemin de fer	Plaine de l'Isère
Torrents de Saint-Agnès	7-8 juillet 1939	Crue Arbres déracinés, blocs de rochers emportés, dégâts sur les chemins	Ste-Agnès
Froges	1937	Inondations	Froges
Vorz	1948	Ravinement du chemin du Chenevrey	Ste-Agnès
Vorz	1986	Engrèvement du plan d'eau de la Gorge, incision du lit et coulée de boue en amont. Inondation de quartiers dans la plaine de l'Isère	Ste-Agnès et plaine de l'Isère
Vorz Alpes du Nord	1-3 juillet 1987	Crue torrentielle paroxystique, dégâts entre la prise d'eau du Pleyet et la scierie. Destruction d'une partie de la chaussée du chemin communal N°8. Arrêté CATNAT	Ste-Agnès
Vorz	Printemps 1989	Crue torrentielle du ruisseau du Grand Joly et du Vorz. Dommages à la Gorge sur la voirie lors des franchissements des cours d'eau.	Ste-Agnès
Vorz	Juin 1991	Remplissage de la plage de dépôt de la Gorge	Ste-Agnès
Ruisseaux des Crozets Montgouyard et de l'Eglise	8 Juin 1996	Débordement dans les champs, dégâts sur la voirie. Arrêté CATNAT	Ste-Agnès
Vorz Belledonne Alpes du Nord	22-23 août 2005	Crue torrentielle, lave torrentielle, glissements de terrain. Dégâts considérables sur la voirie, les viabilités. Deux ans de travaux de remise en état. Arrêté CATNAT	Ste-Agnès et communes avoisinantes
Vorz	17 Juin 2007	Déchaussement de blocs des enrochements construits à la suite de la crue de 2005. Réparations	Ste-Agnès

TAB. 1.3: Crues du Vorz enregistrées au cours du XX^{ème} siècle

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 1 :

Cette présentation générale du contexte dans lequel se trouve le bassin versant permet de mieux appréhender ses comportements hydrologiques futurs, et les différents challenges auxquels nous allons être confrontés. Les points importants sur lesquels nous devons nous appuyer pour la suite de ce travail et ayant pu être dégagés au cours de ce chapitre sont les suivants :

- 1. La crue du 22-23 Août 2005 sur le Vorz a été particulièrement violente et a causé environ 7 millions d'euros de dégâts. Elle semble due à des précipitations très intenses localisées en altitude (300mm en 48h à la Pra), qu'il est difficile de quantifier précisément, et ayant eu pour conséquence le débordement de plusieurs torrents du massif.*
- 2. A la suite de ces crues, le Laboratoire EDYTEM a réalisé une étude approfondie du bassin ayant permis de dégager ses caractéristiques principales et de mieux comprendre les phénomènes de crues s'y produisant ([Rapport Vorz, 2008](#), sous la direction de [F.Allignol](#), [1]).*
- 3. La position du bassin versant en bordure ouest du massif de Belledonne l'expose directement aux régimes météorologiques d'ouest qui impactent fortement sa climatologie. De taille limitée (20km^2), il s'étend de 740 à 2977 mètres d'altitude.*
- 4. La climatologie du massif de Belledonne est relativement contrastée avec des hivers rigoureux et des étés pouvant être chaud. Au niveau pluviométrique, l'exposition aux régimes d'ouest et la position du massif comme premier rempart alpin depuis l'Atlantique lui confère des cumuls annuels conséquents (environ 1000 mm en plaine).*
- 5. La géologie du bassin est typique des massifs cristallins externes, avec des roches métamorphiques très résistantes dans sa partie haute, et des terrains sédimentaires plus érodables dans la partie basse.*
- 6. Hydrologiquement parlant, on se trouve sur un bassin versant de type pluvio-nival, avec une forte couverture neigeuse une grande partie de l'année (de Décembre à Mai/Juin). On notera également que le bassin versant possède une spécificité par rapport à ceux alentours, puisqu'il dispose de la présence d'un petit édifice glaciaire (Glacier de Freydane). La géomorphologie semble jouer un rôle important dans la nature des écoulements sur certaines zones du versant (partie inférieure).*
- 7. D'après les premières observations, l'intensité et la fréquence des crues est liée aux évolutions climatiques que l'on peut observer depuis plusieurs siècles. Ainsi, il semble que si la fréquence des crues tend à diminuer dans une période*

CHAPITRE 1. CONTEXTE GÉNÉRAL DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

de réchauffement comme aujourd'hui, leur intensité est croissante et en fait donc des événements potentiellement dangereux.

Ces premières conclusions mettent en évidence le caractère spécifique et fortement hétérogène des zones de montagne. En conséquence, étudier l'hydrométéorologie sur ce bassin nécessitera de mieux comprendre les processus qui s'y déroulent. Dans ce cadre, il semble indispensable de mettre en place un réseau de mesures hydrométéorologiques particulier et adapté aux zones de montagne. Nous allons donc dans les chapitres suivants répondre à ces questions en étudiant :

- De quelle manière il est possible d'implémenter un réseau de mesure spécifique aux zones de montagnes (Chapitre 2)*
- Quelles seront les caractéristiques permettant à notre réseau de s'adapter à la variabilité de l'hydrométéorologie en montagne (Chapitre 3)*
- Les principaux résultats des mesures et enregistrement effectués ces trois dernières années (Chapitre 4)*

1.7. CRUES HISTORIQUES :

Chapitre 2:

Etat de l'art de la mesure hydrométéorologique en montagne :

Sommaire du Chapitre:

2.1 Capteurs hydrométéorologiques :	45
2.1.1 Historique :	45
2.1.2 Méthodes de mesures.....	46
2.2 Résolution spatiale des réseaux de mesures traditionnels :	54
2.2.1 Réseau de mesure National :	54
2.2.2 Réseau de mesure régional et alpin :	55
2.2.3 Difficultés de mises en oeuvre et limites :	56
2.3 Techniques de mesure à distance :	60
2.3.1 Utilisation des moyens aériens et satellitaires :	60
2.3.2 Techniques de télédétection nivologique :	65
2.3.3 Du satellite à la video-numérique :	67
2.3.4 Perspectives futures :	67
2.4 Vers la mise en place d'un réseau local à forte densité :	69
2.4.1 Les bassins d'études expérimentaux :	69
2.4.2 Application au Vorz :	71

Introduction du Chapitre 2 :

Au travers la présentation générale du bassin versant, le premier chapitre a montré la nécessité de mieux l'observer, afin de cerner les processus hydrométéorologiques s'y déroulant. En conséquence, il va être nécessaire de développer un réseau de mesure sur le bassin, adapté à ses caractéristiques spécifiques, et capable de rendre compte de son hétérogénéité. Il convient maintenant de dessiner le cahier des charges de ce réseau, adapté à sa localisation particulière en zone de montagne. En effet, cette caractéristique essentielle entraîne de fortes contraintes sur les techniques d'instrumentations utilisées qui doivent être adaptées aux milieux de montagne.

De manière générale, les techniques d'instrumentations et d'observations hydrométéorologiques peuvent se diviser en deux groupes distincts.

Tout d'abord, les techniques d'instrumentations directes qui utilisent des instruments in-situ (stations météorologiques, capteurs ponctuels, relevés de terrain,...), et effectuent des relevés réguliers, générant bien souvent de fortes contraintes opérationnelles pour fonctionner de manière efficace et satisfaisante.

Ensuite, les techniques d'instrumentations indirectes qui permettent d'obtenir des informations sur le milieu observé depuis un point éloigné. Ces techniques sont par exemple les techniques de télédétection ou d'analyse des photographies de campagnes aéroportées, ou encore d'analyse d'image du bassin versant. De part leur précision spatiale et leur mise en oeuvre rapide ces techniques sont efficaces, mais cependant, elles présentent de fortes contraintes au niveau de la disponibilité, de l'analyse et de la résolution temporelle des données.

Au cours de ce chapitre, nous allons nous efforcer de dresser un bilan le plus exhaustif possible de l'ensemble des techniques disponibles, afin de faire un choix, pour la mise en oeuvre du cahier des charges et du plan d'instrumentation du Vorz. Nous nous intéresserons dans un premier temps aux types de capteurs qu'il est aujourd'hui possible d'utiliser, et, à quelles difficultés de mise en oeuvre nous allons être confrontés. Puis, nous verrons quels sont les réseaux d'ores et déjà disponibles dans notre zone d'étude. Dans un second temps, nous présenterons les techniques d'observations satellitaires, ainsi que les potentiels d'utilisations qu'elles présentent à l'heure actuelle, et leurs perspectives d'utilisations futures. Enfin, nous dessinerons les contours du plan d'instrumentation en construisant le cahier des charges à partir des analyses menées dans ce chapitre.

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :

Section 2.1

Capteurs hydrométéorologiques :

2.1.1 Historique :

L'histoire de la mesure des évènements météorologiques remonte à l'antiquité (entre -500 et -200 av. JC). Dès cette époque, les grecs en particulier s'intéressaient aux quantités de pluies afin de prévoir les rendements des futures cultures. Les mesures de températures apparaissent quand à elles bien plus tard, à partir du *XVII^{ème}* siècle, quand Galilée met en évidence les changements du volume de l'air en fonction de la température.

Les premiers véritables pluviomètres connus apparaissent au *XV^{ème}* siècle en Corée et faisaient partie intégrante d'un réseau de mesure "national". Au cours du temps, les pluviomètres se perfectionnent, même si le principe de la mesure de recueillir l'eau dans un réceptacle cône ne change pas fondamentalement. Au fil du temps, des mécanismes d'enregistrements sont progressivement développés, afin de rendre la mesure automatique et de s'affranchir de la lecture directe. Ainsi, c'est sur la méthode de mesure automatique des pluies que les plus grandes évolutions se font et divers mécanismes sont inventés et dont certains sont encore utilisés aujourd'hui comme les augets basculants (dès le *XVII^{ème}* siècle), les enregistreurs à flotteurs ou les pluviomètres à balance (*XIX^{ème}* siècle). Aujourd'hui, les pluviographes ont été remplacés par des "loggers" électroniques, et les données sont enregistrées directement sous format numérique.

La mesure de la température débute au le *XVII^{ème}* siècle et repose sur le principe de changement de volume de l'air en fonction de la température. Le premier thermomètre à mercure est développé par Anders Celsius en 1741. Au cours du temps, les techniques se développent et on mesure la dilatation de métaux (sous forme liquide) pour calculer les variations de températures. Les premiers thermomètres à maximum et minimum voient le jour au milieu du *XVIII^{ème}* siècle. Tout comme les pluviomètres, les mesures sont aujourd'hui automatisées et stockées directement sous format numérique.

A partir du moment où les instruments de mesures étaient disponibles, des stations météorologiques complètes se sont mises en place. La première véritable station de mesure est construite en 1663 par l'anglais Christopher Wren et est appelée météographe. Cette station était capable de mesurer la température de l'air, la direction du vent et les précipitations. A la suite de celà, les premiers observatoires météorologiques voient le jour. Cependant, les premières mesures effectuées en altitude n'apparaissent que bien plus tard, au *XIX^{ème}* siècle. Le premier observatoire d'altitude est installé en 1847 au Hochobir en Autriche (2044 mètres). En France, les premiers observatoires sont construits au Puy de Dôme (1467 mètres) en 1878, au Pic du Midi (2860 mètres) en 1881 (*Tissandier, 1893, [113]*) et au Mont-Blanc (4359 mètres) à l'observatoire Vallot en 1890 (*De Mériel, 1897, [82]*). Aujourd'hui, la plupart de ces observatoires qui nécessitaient la présence d'opérateurs pour effectuer les mesures sont automatisés, et le dernier observatoire météorologique en montagne de France est en service depuis 1894 au Mont-Aigoual (1567 mètres).

2.1. CAPTEURS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES :

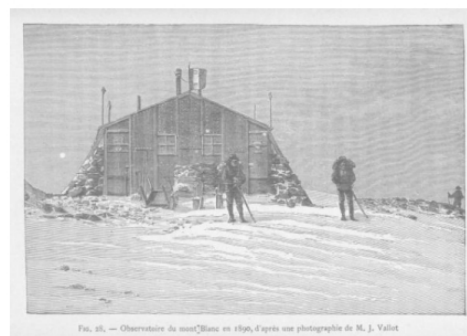
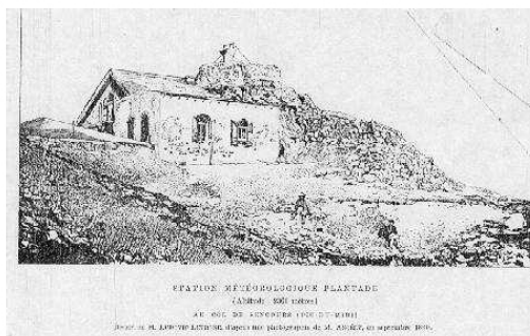


FIG. 2.1: Premiers véritables observatoires de Montagne français : L'Observatoire du Pic du Midi achevé en 1881 et l'Observatoire Vallot en 1890

2.1.2 Méthodes de mesures

2.1.2.1 Pluviométrie :

La mesure de la pluviométrie sur un bassin versant est une donnée essentielle dans l'établissement des bilans hydrologiques. Elle repose sur des principes simples de collecte d'eau sur une surface définie. Cette mesure de quantité de précipitations peut être réalisée à différents pas de temps, en particulier définis par le type de matériel utilisé. Il existe une grande variété de capteurs utilisés pour mesure la pluviométrie (*Civiate, 2008, [21]*), parmi lesquels les matériels les plus courants sont les totalisateurs et les pluviomètres.

a) Totalisateur :

Les totalisateurs permettent de connaître le total de précipitations tombées pour une période de temps donnée. Le plus souvent, ce type d'appareil est disposé dans des endroits peu accessibles ou peu visités, ils sont donc particulièrement adaptés aux zones de montagnes. Comme ils ne présentent généralement pas d'enregistreur automatique pour des mesures d'averses, ils ne renseignent que sur les cumuls pluviométriques pour des périodes relativement longues (mensuelles, annuelles,...). Cependant, du fait de leur grand volume et de la collecte de toutes les précipitations, ils permettent de prendre en compte convenablement la neige dans les cumuls pluviométriques. Afin de conserver l'eau et de ne pas observer de gel, ils sont généralement équipés d'un antigel et d'un liquide moins dense que l'eau se positionnant en sommet de colonne pour empêcher l'évaporation.

b) Pluviomètre :

Un pluviomètre moderne est simplement constitué d'un collecteur de surface déterminée et d'un système de mesure de l'eau transitant par celui-ci. Ainsi, il n'y a pas de stockage et l'eau ne fait que passer dans le dispositif, déclenchant ainsi les mécanismes de mesure qui peuvent être de plusieurs types. Le plus connu est le système à augets basculants, constitué d'augets de volume connu qui basculent en déclenchant un compteur pour un volume d'eau déterminé. Il existe également d'autres types de mécanismes de mesures : les pluviomètres à balance, optiques,...

L'avantage des pluviomètres est qu'ils permettent de mettre en valeur les intensités de précipitations précises sur de courtes périodes de temps (10 minutes ou moins), donnant accès

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :



FIG. 2.2: Des premiers instruments de mesure de la pluie aux pluviomètres à augets modernes : 1-Pluviomètre ancien Mangon.H (fin *XIX^{ème}*) 2-Pluviomètres à lecture manuelle 3-Pluviomètre à enregistreur 4-Pluviomètre à augets basculants

à des informations essentielles sur la typologie des épisodes pluvieux (court et intense, long et modéré,...). Cependant, il n'est bien souvent pas possible avec un pluviomètre classique de connaître les quantités de précipitations neigeuses. Bien qu'il existe des pluviomètres chauffants permettant de faire fondre la neige au fur et à mesure de son accumulation, ce genre de système est coûteux en énergie, et il est difficilement exploitable en zones isolées.

La précision des mesures pluviométriques est sans cesse sujette à débats, en particulier en raison de la multiplicité des facteurs sources d'erreurs. Ainsi, on considère que globalement la précision de l'appareil en lui-même est de l'ordre de 5% (*Civiate, 2008, [21]*), mais un ensemble de facteurs inhérents à la position de l'appareil et aux conditions de mesures entre également en compte. Il conviendra donc lors de l'installation de veiller à l'implantation du pluviomètre, à l'écart des obstacles et en particulier du couvert végétal, ou encore aux caractéristiques aérologiques du site, le vent déviant la trajectoire des précipitations. De plus, l'entretien de l'appareil doit être régulier afin de maintenir le cône de réception le plus propre possible et de se prémunir contre une dérive du système d'augets (erreurs de surremplissage, mauvais basculement, débordement,...).

2.1.2.2 Neige & Nivologie :

La neige est un matériau particulièrement difficile à mesurer et à quantifier, notamment en raison de son hétérogénéité spatiale, temporelle et même interne (*Taillandier, 2006, [111]*). De plus, chaque discipline s'intéresse à un aspect particulier du manteau neigeux. Ainsi, les hydrologues chercheront tantôt à quantifier la présence ou non de neige, tantôt à calculer l'équivalent en eau, pour lequel une composante de profondeur et structure entre en jeu. Dans le même temps, les prévisionnistes du risque d'avalanche et des mécanismes de déclenchement, s'intéresseront eux à la structure interne du manteau neigeux (*Eckert, 2007, [38]*; *Martin, 2005, [76]*). En conséquence il existe un grand nombre de techniques de mesure de la neige.

a) Nivo-pluviomètre totalisateur & Nivomètre :

Le premier instrument que l'on peut utiliser est le nivo-pluviomètre qui collecte l'ensemble des précipitations, il correspond en réalité au totalisateur que nous avons déjà mentionné précédemment. Le nivomètre quant à lui correspond au pluviomètre chauffant et mesure les chutes de neige durant les épisodes par quantification de l'eau de fonte (résistance).

2.1. CAPTEURS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES :

b) Sonde & Planche à neige :

Ce sont les outillages les plus simples pour mesurer la neige. Il s'agit ici simplement de mesurer la hauteur du manteau sur une règle ou une planche graduée, pour chaque épisode et pour l'ensemble du manteau (quantification des phénomènes de tassement). Généralement cette mesure se fait de manière manuelle et certains sites peuvent être munis de webcam afin de d'augmenter le pas temps de mesure en effectuant le travail à distance.

c) Télénivomètre à rayonnement Gamma :

Ces appareils n'existent aujourd'hui plus en France mais ils ont constitué l'essentiel des chroniques nivologiques entre le années 70 et 2003, date du dernier démontage de ces dispositifs (essentiellement pour des raisons médiatiques). Il existait ainsi deux type de d'appareils utilisés en fonction de l'importance du manteau neigeux : Les verticaux pour les faibles hauteurs et les horizontaux pour les forts couverts nivaux. Le principe de la mesure est d'utiliser une source radioactive et un scintillomètre mobile (télénivomètres horizontaux) ou non (télénivomètres verticaux). De cette manière, on mesure l'atténuation du signal radioactif entre l'émetteur (source radioactive) et le récepteur (scintillomètre), ce qui permet de revenir à la hauteur du manteau neigeux et à la quantité d'eau qui y est présente.

d) Nivomètre à Rayonnement Cosmique (NRC) :

Le Nivomètre à Rayonnement Cosmique ou NRC est développé en France par EDF-DTG depuis 1998 ([Tourasse, 2002, \[114\]](#)). Comme le télénivomètre, il est basé sur la mesure de l'atténuation d'un rayonnement, qui est ici naturel, puisqu'il s'agit du rayonnement cosmique. Il est constitué d'un mat métallique d'une hauteur conséquente (afin d'être en permanence à la surface du manteau), et équipé d'une station météorologique classique (pression, température pour les conditions de la mesure). Dans un premier temps, au niveau du sol, un détecteur est installé et compte le nombre de particules issues des interactions du rayonnement cosmique avec l'atmosphère et l'eau du manteau neigeux. Dans un second temps, une mesure est effectuée à l'air libre et permet d'une part de comparer les deux valeurs par une analyse du signal afin d'en déterminer le contenu en eau de la neige, et, d'autre part de compenser les variations de l'intensité du rayonnement cosmique lié à l'activité solaire ([Paquet, 2006, \[93\]](#)). La hauteur de neige est elle obtenue à partir d'une sonde à ultrasons placée au sommet du mat.

e) Sondages & Mesures des caractéristiques du manteau neigeux :

La dernière technique sur laquelle nous allons nous attarder est la technique du sondage, principalement utilisée par Météo-France et plus généralement par l'ensemble des organismes de prévision du risque d'avalanche. Ce type de sondage est réalisé par un opérateur en un site de mesure unique, ce qui en fait une des méthodes les moins représentatives en terme résolution spatiale, mais l'une des plus efficaces en ce qui concerne la caractérisation du manteau neigeux. Durant ces sondages, on mesure d'abord la hauteur de neige, puis la résistance du manteau neigeux (sondage par battage). Ensuite, une tranchée est creusée et permet d'atteindre l'ensemble des couches composant le manteau, dont un profil statigraphique détaillé est réalisé (nature des grains, masse volumique, température, résistance,...). Ainsi, ces données sont essentielles dans l'alimentation des modèles nivologiques permettant la prévision de la stabilité du manteau neigeux. Cependant, la faible quantité de mesures effectuée et la faible représentativité spatiale et temporelle en font une des techniques les moins utilisées en hydrologie quantitative.

Dans certains cas, des équipements plus spécifiques peuvent être installés pour mesurer les

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :



FIG. 2.3: Instruments de mesures nivologiques :1-Perche à neige et sondage 2-Nivomètre 3-Sonde à ultrasons 4-Télénivomètre à rayonnement cosmique

caractéristiques du manteau neigeux. Il est ainsi possible à partir de ces instruments de déterminer sur le site de mesure l'équivalent en eau du manteau neigeux (*Sommer, 2009, [109]*).

2.1.2.3 Température :

La température est une donnée essentielle en météorologie. En effet, cette information permet déterminer de quelle manière se produisent les échanges thermiques à l'origine des vents, et, en conséquence, du type de temps (nuages, ciel dégagé,...). Sur les bassins versants de montagne, la température est très variable du fait des changements d'altitude (gradients verticaux) et de l'exposition des versants. De plus, elle joue un rôle majeur pour les chutes de neige (limite Pluie/neige), l'évolution du manteau neigeux (fonte) et des glaciers (limite d'ablation), ou encore dans les croissances végétales et les pertes d'eau par évapotranspiration. De fait, de nombreuses techniques de mesures de ce paramètre se sont développées au cours du temps (*Civiate, 2008, [22]*), et nous présenterons ici les techniques les plus couramment utilisées.

a) Thermomètres classiques :

La mesure de la température est définie en météorologie comme suit : "La température est mesurée sous abri, à une hauteur de 1,5 mètres du sol". Actuellement, la majorité des thermomètres météorologiques fonctionnent de la même manière, c'est-à-dire à partir d'une sonde thermométrique à résistance de platine. On mesure ainsi la variation de résistance d'un conducteur électrique en fonction de la température ambiante, et donc de l'air. Ces systèmes sont relativement précis et la température est mesurée avec une incertitude 0,1 à 0,2°C. L'incertitude majeure sur la connaissance des températures est donc due à l'installation du capteur lui-même (*Jobard, 2008, [64]*), qui doit être faite en vue à répondre aux normes classiques : protection au soleil, conditions aérologiques, distance d'isolement de la végétation,...

b) Capteurs miniatures :

Ces dernières années, la miniaturisation des matériaux électroniques a permis la création de mini-capteurs (*Hoelzle, 1999, [59]*), dont les plus connus sont les *iButton*® (*Hubbart, 2005, [62]*; *Lundquist, 2008, [74]*), et les *Tinytag*® (*Brown, 2005, [16]*; *Bonnefoy, 2010, [15]*). Ces capteurs de quelques centimètres de diamètre (taille d'une pile de montre) permettent de mesurer et enregistrer la température dans une multitude d'endroits (rocher, eau, machines,...), à des pas de temps extrêmement variés (quelques millisecondes à quelques heures). D'autre part, la durée d'enregistrement n'est limitée que par la capacité de la mémoire et la durée de vie de la batterie interne (quelques années). De plus, ces capteurs sont robustes et peuvent endurer froid, humidité ou fortes températures.

2.1. CAPTEURS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES :



FIG. 2.4: Des premières mesures de la température aux capteurs miniatures : 1-Thermomètres anciens (Thermomètre à bulles, Antonini.D, 1612) 2-Sonde et capsule de protection 3-Thermomètre classique MétéoFrance 4-iButton 5-TinyTag

L'ensemble de ces caractéristiques en font des candidats idéaux à l'installation dans le milieu naturel, d'autant plus que leur coût est très modéré et qu'il est donc possible d'en installer un grand nombre. Cependant, contrairement aux stations météorologiques classiques ces capteurs sont très sensibles aux conditions dans lesquelles s'effectue la mesure, puisqu'ils ne disposent pas forcément des équipements nécessaires à une mesure selon les normes traditionnelles ([Hubbart, 2005](#), [62]). En conséquence, les données de ces capteurs doivent essentiellement être utilisées en valeur relative, en gardant à l'esprit la possible dérive comparée aux stations météorologiques.

c) Fibre optique :

À l'image des capteurs de températures miniatures, des systèmes de mesures basés sur l'utilisation de fibre optique se sont développés ces dernières années. Ces systèmes permettent ainsi de mesurer des champs de températures sur de grandes distances. On peut par exemple les utiliser pour mesurer la température des rivières, ou encore la température dans les premiers centimètres du sol, ou à l'interface de différents milieux (neige/sol ou neige/air par exemple).

2.1.2.4 Insolation & Ensoleillement :

Quantifier les périodes de fort ensoleillement est très intéressant dans diverses disciplines comme par exemple en agronomie et biologie végétale (croissance des plantes, calcul des rendements) ou en hydrologie. Dans notre cas, cette information peut être utilisée pour améliorer la modélisation de certains aspects du système hydrologique (évapotranspiration, sublimation de la neige). Dans un premier temps, la connaissance de l'évapotranspiration permet de mieux estimer les quantités d'eau disponibles pour les écoulements. Dans un second temps, et plus particulièrement sur les bassins versants de montagne, l'ensoleillement et l'insolation jouent

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :



FIG. 2.5: Instruments de mesure de l'insolation : 1-Héliographe 2-Pyranomètre 3-Pyranomètre (Campbell)

un rôle majeur dans les phénomènes de fonte des neiges.

Il existe deux grands types d'appareils pour réaliser ces mesure : l'héliographe et le pyranomètre.

a) Héliographe :

Inventé en 1853 par *Campbell*, l'héliographe mesure la durée d'ensoleillement journalière, à l'origine, à partir de la brûlure d'une feuille de carton. Dans le principe, une sphère de verre joue le rôle de lentille qui concentre les rayons du soleil et permet de recueillir l'énergie reçue à la station. Aujourd'hui, les héliographes fonctionnent avec des cellules photovoltaïques et qui peuvent être à fonctionnement dynamique (capteur tournant analysant le contraste entre luminance du ciel et du soleil) ou à fibre optique (recueil le rayonnement total provenant du soleil).

b) Pyranomètre :

A l'image des héliographes, les pyranomètres mesurent l'impact du soleil sur la terre. Cependant, les pyranomètres permettent de mesurer à la fois la durée d'ensoleillement, mais également son intensité. Ainsi, la mesure se fait sur la quantité de rayonnement globale venant du ciel (en W/m^2) ou sur la valeur de l'irradiance (en $W/m^2/s$). Le système de mesure repose sur un ensemble de coupelles de verre concentrant le rayonnement et filtrant les longueurs d'ondes à mesurer (entre 0,3 et 3 mm), et de thermocouples enregistrant la force électromotrice produite par la pression de rayonnement. Les pyranomètres peuvent être de deux types : soit à échanges verticaux, soit à échanges horizontaux (plus répandus) mais le principe de la mesure reste globalement le même.

2.1.2.5 Hydrométrie :

Lors de la réalisation des bilans hydrologiques, une valeur incontournable est la décharge hydrologique à l'exutoire du bassin versant qui s'obtient par la mesure hydrométrique de la rivière ou du torrent. Pour réaliser cette mesure, il existe un panel varié de méthodes et techniques que nous allons rapidement présenter. D'une manière générale, le principe de la mesure hydrométrique repose sur la hauteur et la vitesse d'une rivière afin d'en calculer le débit.

Au chapitre des méthodes de mesure, on pourra citer les plus utilisées d'entre elles comme les méthodes volumétriques, les méthodes d'exploration du champ de vitesse, les méthodes de dilution ou encore les méthodes hydrauliques. L'ensemble de ces méthodes ont permis de

2.1. CAPTEURS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES :

développer un grand nombre de capteurs hydrométriques, on reprendra ici la classification utilisée dans la thèse de G. Fourquet ([Fourquet, 2005](#), [42]).

a) Niveau d'eau et hauteur :

La hauteur reste probablement la grandeur la plus aisée à mesurer sur un cours d'eau et s'obtient par l'intermédiaire de limnimètres (limnigraphes pour des chroniques). Un grand nombre de techniques plus ou moins complexes se sont donc développées autour de cette mesure. Tout d'abord, l'outillage le plus simple est l'échelle graduée qui permet une lecture de la hauteur instantanée par un opérateur, et est bien souvent utilisée pour des données ponctuelles. Plus perfectionné, le limnigraphe à flotteur permet de mesurer la hauteur de l'eau par l'intermédiaire d'un flotteur et d'enregistrer les données numériquement. Les capteurs bulle-à-bulle pour leur part utilisent les différences de pression induites par les variations de niveau de la rivière pour évaluer la hauteur. Enfin, le capteur le plus répandu est le capteur piezométrique qui utilise le même principe de variation de la pression hydrostatique. Peu coûteux et fiable il est donc très couramment utilisé.

b) Estimateurs de débits et courants :

La deuxième manière d'estimer le débit d'un cours d'eau est d'en déterminer la vitesse en plusieurs points de la rivière. La mesure de base s'effectue à l'aide d'un moulinet et d'une perche. Ainsi on mesure pour différentes profondeurs le long du profil de la rivière les différentes vitesses, afin d'en calculer le champ de vitesse général. Le débit peut alors être calculé en "sommant" l'ensemble de ces mesures ponctuelles, et, permet de déterminer la courbe de tarage, donnant la relation entre hauteur et débit. Pour de petits cours d'eau ou des mesures ponctuelles, le moulinet est suffisant, cependant, pour des campagnes de mesures plus lourdes et systématiques, on préférera le saumon qui fonctionne selon le même principe mais sur des appareillages plus conséquents (treuil, câbles,...). La vitesse de l'eau peut également être mesurée par des sondes électromagnétiques, des sondes à ultrasons ou des appareils ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) ou ADCP (basés sur l'effet doppler).

c) Capteurs non-intrusifs :

Les capteurs non-intrusifs permettent de travailler même en période de crue. En effet, lors de ces épisodes, les appareillages permanents placés dans le lit sont bien souvent dégradés ou très en dehors de leurs gammes mesures. On retrouve ainsi bien souvent les mêmes principes de mesures que précédemment, à la différence que ceux-ci sont placés hors de la rivière. On peut par exemple citer les capteurs à ultrasons ou radars mesurant les temps d'aller retour d'un signal d'un capteur à la surface (pont,...), ou encore les satellites et GPS ([Apel, 2009](#), [2]) pour des rivières de taille conséquente, ce qui ne sera pas le cas dans notre étude.

d) Capteur HyMAGE-TIP :

Le capteur HyMAGE-TIP développé depuis 2008 (Thèse G.Fourquet, [42]) est un exemple de capteur non-invasif opérationnel, équipant à l'heure actuelle une partie des sites de mesures du SPC-Grand Delta (Service de Prévision des Crues). Le principe consiste à placer une caméra en bordure de rivière et de la filmer en continu. Ainsi, sur chaque image, on mesure la hauteur de l'eau par détection automatique de celle-ci sur la berge opposée (échelle, pont, points fixes,...). Cette hauteur est ensuite complétée par l'analyse du champ de vitesse entre deux images de faible pas de temps (flotteur, champs de vitesse général,...). L'ensemble de ces informations (2D) sont replacées dans un contexte réel (3D), et, on peut recalculer les valeurs

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :



FIG. 2.6: Instruments de mesures hydrométriques :1-Jaugeage manuel au saumon 2-Saumon 3-Camion de jaugeage 4-ADCP

réelles de hauteurs et débits. Ainsi, on obtient en continu une valeur de débit pour une rivière donnée, et ce même en cas de crues.

Section 2.2

Résolution spatiale des réseaux de mesures traditionnels :

Il existe une grande variété d'instruments permettant de mesurer les grandeurs hydrologiques caractérisant les bassins versants. Nous allons nous intéresser maintenant aux différents réseaux de mesures disponibles en France, et plus particulièrement à ceux que nous sommes susceptibles d'utiliser dans le cadre de notre étude. A ce titre, les deux opérateurs nationaux incontournables sont : Météo-France gageant d'une couverture optimale sur l'ensemble de l'hexagone en raison de son utilisation pour la prévision météorologique, et, EDF qui pour sa gestion des installations hydroélectriques se doit de quantifier les ressources en eau, en particulier en montagne, et dispose d'un grand nombre de stations dans ces zones.

2.2.1 Réseau de mesure National :

On distinguera les réseaux de mesures climatologiques et les réseaux hydrométriques.

2.2.1.1 Réseau de mesure climatologique :

Près de 4200 stations météorologiques Météo-France (*source climathèque météoFrance*) se répartissent sur l'ensemble du territoire fonctionnant de manière régulière à différents pas de temps (horaire ou moins, à journalier ou plus). A cela viennent s'ajouter les sites gérés par EDF comptant environ 600 stations sur les massifs montagneux français (*Gottardi, 2009, [47]*). Globalement, on a donc un bon échantillonnage spatial sur l'ensemble du territoire (cf. figure 2.7), avec une densification du réseau dans les zones les plus sensibles (pourtour méditerranéen, massifs montagneux). En terme de chiffre, le réseau peut être résumé par sa densité spatiale globale avec un taux général de $6,25 \text{ station}/1000\text{km}^2$, ce qui correspond à une station météorologique pour 160 km^2 . En conséquence, ce réseau est adapté aux études climatologiques à grande échelle (nationale, régionale), ce qui est l'objectif principal de Météo-France. Cependant, il convient d'étudier les solutions alternatives de mesures pour des études plus locales, pour lesquelles le maillage décrit ici ne convient pas.

2.2.1.2 Réseau de mesure hydrométrique :

La plupart des stations hydrométriques du territoire sont gérées par un nombre restreint d'opérateurs (EDF, Agences de l'Eau, CNR,...), et une grande partie des données est accessible par l'intermédiaire de la ("*Banque Hydro*", www.hydro.eaufrance.fr). On dénombre ainsi au moins 1000 stations hydrométriques réparties sur le territoire métropolitain (cf. figure 2.8), ce qui correspond à une densité générale de $1,5 \text{ station}/1000\text{km}^2$, soit une station pour un bassin versant de 675 km^2 . Cependant, le nombre de sites disposant de chroniques régulières et avec un recul historique important est assez limité, avec seulement 195 stations (*Renard, 2008, [101]*). De la même manière, que pour les stations météorologiques, même si la couverture est resserrée sur les zones hydrologiques sensibles, il est essentiel de chercher des sources de données complémentaires ou alternatives dans le cadre d'études locales telles que la notre.

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :

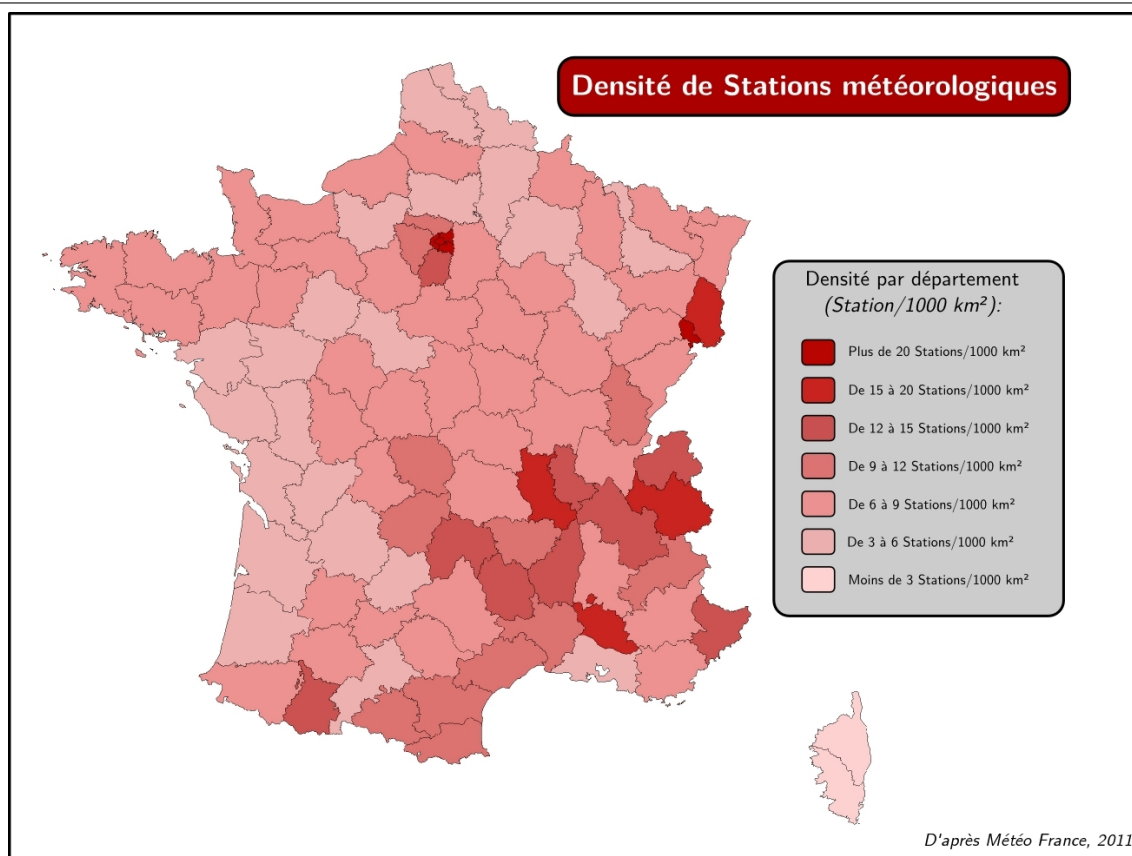


FIG. 2.7: Carte de densité des station météorologiques en France (en Station/ km^2)

En conclusion, même si le réseau d'observation hydrométéorologique national est relativement bien fourni, il n'est pas suffisant pour une étude locale ou même à l'échelle d'un massif montagneux tel que le notre, notamment en raison de la variabilité altitudinale. A titre de comparaison, le Massif de Belledonne s'étend sur 60 kilomètres de long et 10 kilomètres de large (selon un axe Nord-Est Sud-Ouest) soit environ 600 km^2 . Ainsi, en appliquant les moyennes nationales, nous devrions en théorie disposer de 4 stations météorologiques et 1 station hydrométrique, ce qui n'est réellement pas suffisant pour caractériser la variabilité hydrométéorologique d'un massif tel que celui-ci, et encore moins celle d'un petit bassin versant comme celui du Vorz.

2.2.2 Réseau de mesure régional et alpin :

Il est essentiel en zone de montagne de disposer d'un réseau hydrométéorologique suffisamment dense afin de mesurer convenablement la variabilité climatologique des massifs. Il est courant d'utiliser des données provenant de plusieurs réseaux différents, moyennant une phase d'homogénéisation des données. Ainsi, sur le territoire national, on peut espérer en zone alpine constituer un réseau composé par exemple de près de 500 stations de nature différente ([Kieffer 1998, \[68\]](#)), allant du simple pluviomètre manuel aux pluviographes automatiques autonomes. Le massif alpin étant frontalier, et les phénomènes météorologiques étant bien souvent non limités aux frontières, utiliser les données de réseaux étrangers est également une solution.

2.2. RÉOLUTION SPATIALE DES RÉSEAUX DE MESURES TRADITIONNELS :

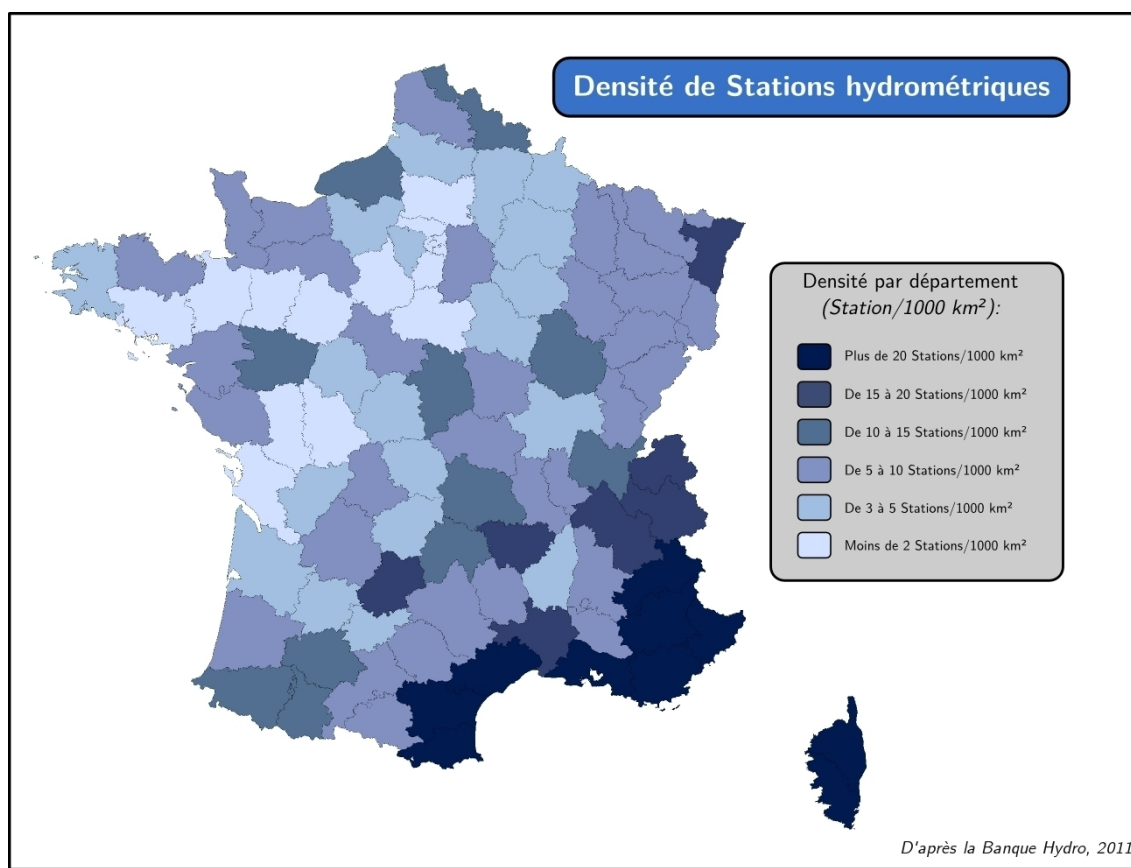


FIG. 2.8: Carte de densité des stations hydrométriques en France (en Station/km²)

Ainsi, on peut augmenter l'échantillonnage spatiale à l'aide des réseaux italiens avec près de 400 postes dans le Piémont (*Djerboua, 2001, [31]*), ou des réseaux suisses frontaliers (200 postes *Gottardi, 2009, [47]*).

Du côté des stations hydrométriques, environ 380 sites sont disponibles pour le massif alpin (Rhône-Alpes, *Banque-Hydro*). Cependant, pour une grande partie de ces stations, les chroniques ne sont pas complètes, ou de fortes incertitudes peuvent être observées. Il conviendra donc de toujours s'assurer en amont de la validité des données. Par exemple, sur le bassin versant de l'Isère qui nous intéresse plus particulièrement, il existe environ 80 stations de mesures opérationnelles.

Au niveau du massif alpin, on peut également citer le **"projet HISTALP"** dont l'objectif est de regrouper sur une même plateforme en ligne (<http://www.zamg.ac.at/HISTALP/>) des données climatiques sur l'ensemble de l'arc alpin. Ces données sont aujourd'hui disponibles (*Bohm, 2009, [100]*) et remontent jusqu'aux années 1760.

2.2.3 Difficultés de mises en oeuvre et limites :

L'instrumentation des milieux de montagne est une tâche particulièrement ardue. En effet, dans ces zones, on est confronté à de multiples facteurs rendant la mesure hydrométéorologique extrêmement compliquée :

- Facteurs météorologiques : Forte variabilité spatiale et temporelle des conditions hydro-météorologiques.

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :

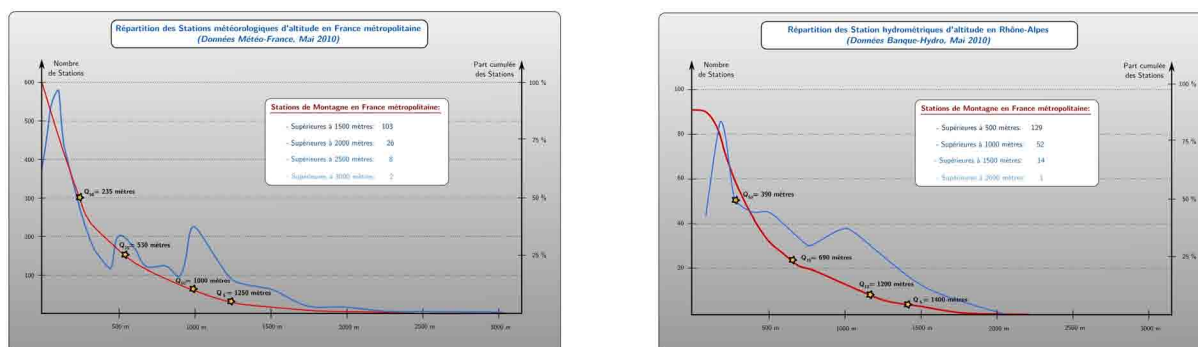


FIG. 2.9: Répartitions altitudinales des stations météorologiques et hydrologiques en France et Rhône-Alpes

- Facteurs physiques : Grande diversité de conditions physiques telles que l'exposition ou l'altitude.
- Facteurs environnementaux : Evolution dans un milieu difficile.

2.2.3.1 Facteurs météorologiques :

La forte variabilité spatiale et temporelle de la météorologie est la spécificité principale des zones de montagnes qui les distingue des zones de plaine. En effet, on se trouve dans un milieu où les conditions météorologiques sont en constante évolution et peuvent changer radicalement en très peu de temps. De plus pour des conditions données sur un versant, celles-ci peuvent être totalement différentes à seulement quelques kilomètres de distance sur le versant opposé. Ainsi, on est sans cesse confronté à des questions de représentativité des mesures pour des échelles spatio-temporelles différentes.

a) Hétérogénéité des températures :

Les températures sont un très bon exemple de la variabilité en montagne. Ainsi dans des conditions optimales, on trouvera un gradient thermique décroissant quasi-linéaire entre les parties basses et les parties hautes du versant. Cependant, il n'est pas rare de se trouver dans la situation inverse, en cas de "bulle froide" entraînant une inversion thermique, comme cela est souvent le cas en automne et hiver dans les vallées. De même, l'hétérogénéité de ce gradient peut également être observée à l'échelle des versants, lorsque entrent en jeu l'exposition, ou encore l'ensoleillement.

b) Hétérogénéité spatiale des pluies :

Les pluies sont rarement homogènes, et ce même en plaine. En montagne, cette variabilité est accentuée, et de forts gradients orographiques y sont observés lors des épisodes pluvieux, en témoigne celui du Vorz en 2005. Cette hétérogénéité est bien évidemment liée à la topographie et aux conditions météorologiques (foehn, retour d'est, régime d'ouest,...), mais également aux températures sur le versant, puisqu'elles déterminent la hauteur de la limite pluie/neige et donc la typologie des précipitations. Ainsi, si il existe déjà une variabilité spatiale et temporelle des pluies, ce phénomène est encore plus fort pour la neige.

2.2. RÉOLUTION SPATIALE DES RÉSEAUX DE MESURES TRADITIONNELS :

c) *Quelles réponses et adaptations des réseaux d'instrumentations ?*

Quelle que soit la technique employée, il est illusoire de vouloir quantifier l'ensemble de cette hétérogénéité à la surface d'un versant. En effet, le problème essentiel est celui de l'échelle. La question est de savoir si le réseau que l'on va mettre en place est adapté et cohérent au vu de l'échelle à laquelle on souhaite modéliser. Ainsi, tout en gardant à l'esprit que les différents niveaux d'échelle ont un impact entre eux (effet des versants voisins, perturbation d'échelle régionale,...), on pourra adapter le maillage spatio-temporel du réseau à telle ou telle problématique de recherche. De fait, travailler sur un réseau d'une dizaine de stations sur l'ensemble d'un massif de plusieurs centaines de kilomètres carrés avec une résolution souhaitée à la dizaine de mètres carrés près, entraînerait une simplification extrême et poserait de réels problèmes d'incertitudes quant aux résultats issus des modélisations sur des petits bassins versants.

2.2.3.2 Facteurs physiques :

Si le facteur d'échelle est un élément important dans la prise en compte de l'hétérogénéité des conditions météorologiques, la topographie des zones de montagnes complique encore ce phénomène.

a) *L'altitude :*

L'altitude d'un massif détermine sa couverture neigeuse d'une part, mais également les conditions de température et de pluviométrie qui y rèneront d'autre part. Cependant, même s'il existe des méthodes alternatives permettant de prendre en compte ces variations, les différences d'altitudes restent la grande spécificité des zones de montagne, et la source principale des difficultés de modélisation, de part leur impact sur les forçages météorologiques. Ne pas en tenir compte, notamment dans l'instrumentation et la modélisation du manteau neigeux rend impossible toute modélisation hydrologique adaptée aux zones de montagne.

b) *L'exposition :*

L'exposition et parfois même la pente associées ont un rôle essentiel sur l'évolution de la météorologie des versants. En effet, en fonction de l'exposition, on observe des effets radicalement différents sur celles-ci. Les différences d'enneigement entre versant nord et sud en sont les témoins privilégiés. Lors de la constitution d'un réseau, il est donc essentiel de prendre en compte cette caractéristique. En effet, instrumenter l'ensemble du versant nord d'un massif pour observer la fonte des neiges, entraînerait des problèmes insolubles lors de la modélisation de la fonte des neiges par exemple. Conjugués avec l'altitude, ces facteurs constituent le principal obstacle à une bonne mesure de l'hétérogénéité spatiale et temporelle des conditions météorologiques en montagne.

2.2.3.3 Facteurs environnementaux :

L'instrumentation en montagne, est confrontée aux problèmes logistiques liés à l'environnement de recherche (transport, accès, climat,...). En dépit du fait que l'on a besoin d'un réseau de mesures dense, il s'avère dans la réalité extrêmement difficile de suivre en continu avec une bonne résolution spatiale les versants de montagne, notamment en raison de leur accessibilité (pente, falaise, temps d'approche et collecte).

Ainsi, les capteurs mis en place doivent être accessibles et laissés à demeure pendant de longues périodes (inaccessibles en hiver). Ils doivent être résistants au froid, à la neige, au vent ou encore au gel. Les critères de robustesse et fiabilité sont prépondérants lors de l'instrumenta-

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :

tion d'un bassin versant de montagne, et il se peut que dans certaines circonstances (données impératives) ils l'emportent sur la précision de la mesure.

Enfin, la tentation est grande de mettre en place des système de télétransmission des données qui permettraient de s'affranchir de ces problèmes en supprimant les phases de collectes, et en rendant l'opérateur réactif au moindre problème sur un capteur. Cependant, nous sommes alors confrontés à des problèmes logistiques importants. Outre la faible couverture par des réseaux de transmissions de données (internet, satellite, wi-fi,...), le problème essentiel vient de l'alimentation en énergie de ces systèmes de transmission à distance. En effet, on ne dispose généralement sur ces secteurs que de l'énergie solaire ou éolienne, voir hydroélectrique (micro-centrale) pour alimenter le capteur. Alternativement, ces différentes sources peuvent présenter des "gap" significatif : en cas de mauvais temps (solaire), de manque de vent (beau temps, zone abritée) ou d'étiage (pas de débit).

La problématique d'équipement d'un bassin versant de montagne est d'utiliser des capteurs robustes, les plus précis possible, disposés de manière à représenter l'hétérogénéité spatiale et temporelle du milieu, en étant accessibles et fonctionnant de manière autonome ; tout en concervant un coût raisonnable. Tel est le challenge que nous avons relevé avec la mise en place d'un réseau hydrométéorologique à haute résolution spatiale et temporelle sur le bassin versant du Vorz.

2.3. TECHNIQUES DE MESURE À DISTANCE :

Section 2.3

Techniques de mesure à distance :

2.3.1 Utilisation des moyens aériens et satellitaires :

Comme on s'est efforcé de le mettre en évidence, la variabilité hydrométéorologique et morphologique des bassins versants de montagne est très importante. Il est essentiel de trouver une manière d'enregistrer un maximum de données spatiales et temporelles pour chacune des mesures réalisées en montagne. En conséquence, l'imagerie, et plus particulièrement l'imagerie aérienne ou satellite semble être une solution adaptée à notre problématique, puisqu'elle permet de recueillir un maximum de données à partir de simples images. Cette technique peut être très efficace, en particulier sur le plan de la résolution spatiale.

2.3.1.1 Outils satellitaires et aériens :

Parmi les différentes techniques de télédétection et d'imagerie, nous en avons retenu 3 principales, pour lesquelles nous allons discuter ici l'applicabilité à notre étude.

a) Images aériennes :

Lorsque l'on souhaite travailler sur des images aériennes en France, la source de données principale est l'IGN, qui produit une base de données d'orthophotographies à une résolution de 50 centimètres sur l'ensemble du territoire. De telles images sont parfaites pour observer l'évolution du manteau neigeux, c'est d'ailleurs l'utilisation essentielle qui serait faite de ces données aériennes. Cependant, l'IGN réalise ses campagnes de mesures avec une périodicité de 5 ans (3 ans en 2014), et la résolution temporelle apparaît insuffisante pour réaliser des analyses journalières, comme c'est notre objectif. A titre d'exemple, la dernière campagne réalisée en Savoie (73) remonte à 2009, 2008 pour la Haute-Savoie (74), quant à l'Isère où se trouve notre bassin, elle date de 2009. Il semble donc que l'utilisation de ce type de données soit envisageable pour observer des tendances à moyen terme comme l'évolution des glaciers, de la végétation ou de l'aménagement du territoire, cependant, elle s'avère impossible dans le cadre de nos travaux hydrométéorologiques.

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :

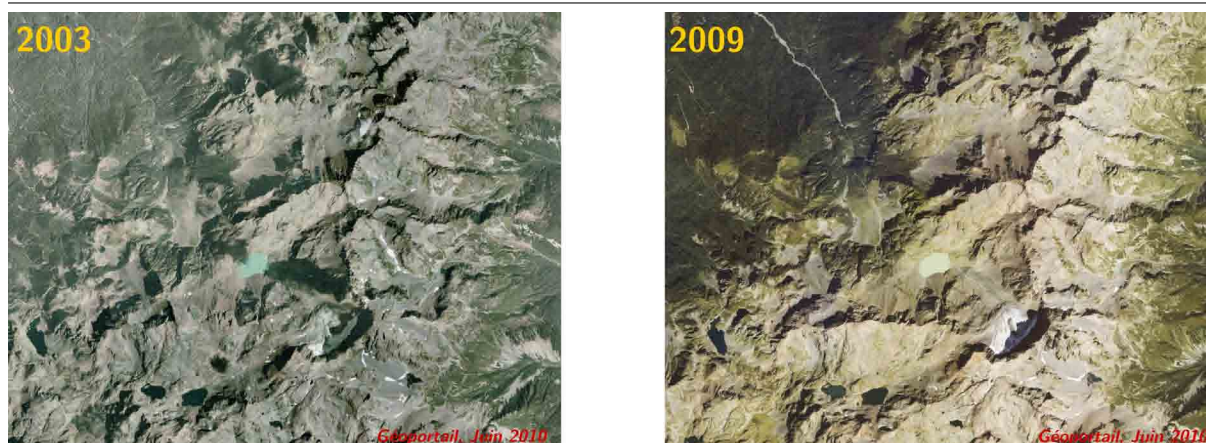


FIG. 2.10: Exemples d'images aériennes du Vorz acquises dans le cadre des campagnes IGN de 2003 et 2009

b) Systèmes Radar :

Les systèmes radars peuvent être de deux types : terrestres ou satellitaires. Dans les deux cas, le principe repose sur l'envoi d'un signal se réfléchissant sur une surface, et la réception par l'émetteur du signal retour. Le temps de parcours et les caractéristiques de variations du signal sont alors analysés, traités et filtrés, de manière à en extraire les informations importantes.

Au niveau du sol, ces systèmes sont particulièrement utilisés en météorologie et permettent de déterminer la typologie et l'intensité des précipitations (pluie, neige,...) en temps réel pour une région donnée. En France, le réseau ARAMIS (Application Radar à la Météorologie Infra-Synoptique) comprend 24 radars qui couvrent le territoire et permettent de connaître l'évolution des précipitations avec une résolution de 1,5 kilomètres environ. Cependant, un des inconvénients du radar est qu'il est très sensible à la topographie, notamment en raison de la complexité de traitement du signal et des zones d'ombres engendrées par les reliefs. Ces difficultés le rendent assez peu utilisable en zone de montagne comme c'est notre cas. Il existe donc des "zones d'ombres" sur le territoire, au niveau des zones de montagne, mais, celles-ci vont être en partie gommées dans la zone sud-est de la France, en particulier, avec la mise en place du projet RHYTMME ([Meriaux, 2011, \[81\]](#)).

A l'heure actuelle, outre l'utilisation du radar pour la détection des précipitations, il est également utilisé pour réaliser des cartographies 3D et des modèles numériques de terrains par les techniques d'interférométrie radar. Ainsi, sensible aux variations de reliefs, il peut être utilisé dans la détection des mouvements glaciaires ou encore dans la dérive des glaces marines. Malgré cela, il semble peu envisageable d'utiliser ce type de données dans le cas de notre recherche, notamment pour le suivi de l'évolution du manteau neigeux ou encore des événements pluvieux intenses (pas de couverture radar satisfaisante).

c) Satellites géostationnaires :

Placés en orbite géostationnaire à environ 36 000 kilomètres de la Terre, ils sont en rotation synchronisée avec celle-ci et par conséquent observe en permanence la même zone, ce qui les rend particulièrement intéressant en terme de résolution temporelle. A ce titre, ils sont utilisés de manière systématique en météorologie et permettent d'observer les tendances à grande échelle (continentale) et le déplacement des masses nuageuses. On peut, par exemple, citer les plus connus que sont les satellites Meteosat, ou de la NOAA. Les premiers offrent une résolution

2.3. TECHNIQUES DE MESURE À DISTANCE :

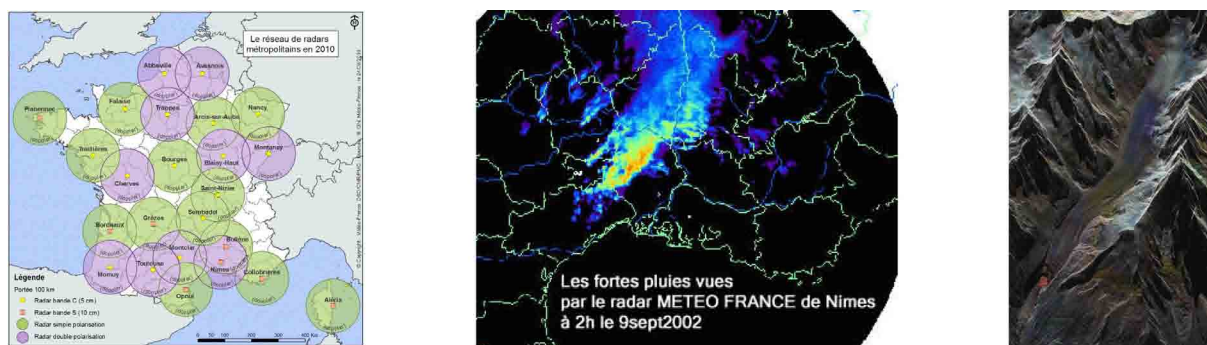


FIG. 2.11: Exemples de l'utilisation de l'imagerie Radar en hydrométéorologie : 1-Couverture des radars météorologiques métropolitains 2-Image radar des précipitations des crues cévenoles du 8-9 Septembre 2002 3-Exemple d'une image satellite radar du glacier d'Argentière (*Glacier d'Argentière, composition colorée de 3 images du satellite radar TerraSAR-X*)

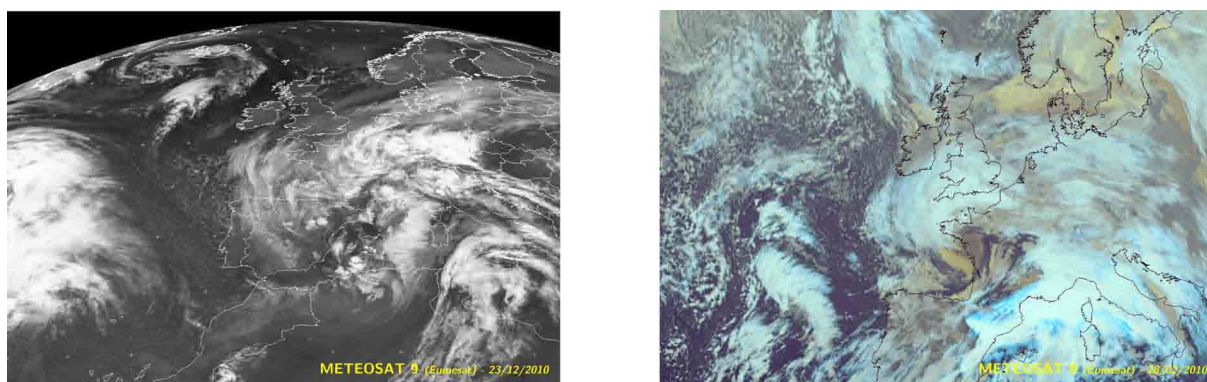


FIG. 2.12: Images acquises par satellites géostationnaires : Exemple d'un épisode neigeux de 2010 (a), et de la tempête Xynthia (b)

de 1 kilomètre avec une répétitivité de quelques minutes (15 à 30 minutes en météo), tandis que les seconds proposent des résolutions de 0,5 à 1 kilomètre pour une répétitivité comparable. Ainsi, ces outils sont particulièrement adaptés à une utilisation dans des études où les données sont nécessaires à haute fréquence temporelle (*Scofield, 2003, [106]*). Cependant, compte tenu de la résolution des images, il est peu envisageable de les utiliser dans le cadre de notre étude, où le bassin versant ne s'étend que sur quelques kilomètres carrés, ce qui ne représenteraient que quelques pixels sur une image.

d) Satellites Héliosynchrones :

Les satellites héliosynchrones sont des satellites dont l'altitude (typiquement de 600 à 1000 kilomètres) et l'inclinaison restent constante au cours du temps. De cette manière, l'heure de passage d'un satellite au-dessus d'un point, et donc l'ensoleillement, reste constante au cours du temps (même heure solaire locale). Ces satellites étant situés à des altitudes basses, ils couvrent l'ensemble de la surface du globe par bandes successives et réalisent une couverture totale en une quinzaine de jours environ. Les données recueillies par ces satellites sont très utilisées dans les domaines de l'environnement, de la géographie, de la biologie, ou encore dans l'étude de l'occupation des sols.

Du fait de leur position plus proche de la surface de la terre, la résolution spatiale est

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :

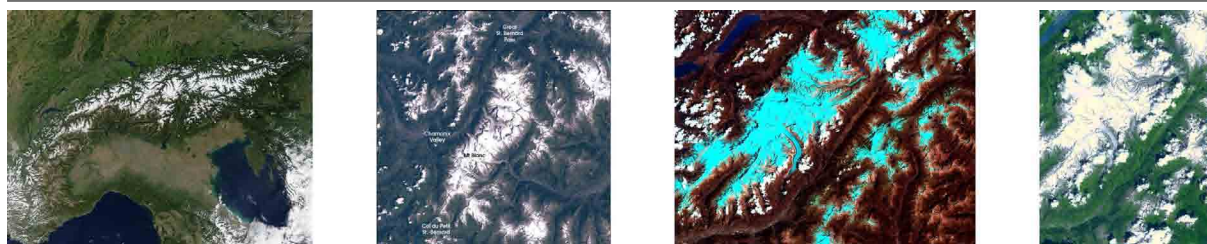


FIG. 2.13: Exemple de l'utilisation de l'imagerie Satellite traditionnelle en hydrométéorologie :
1-Mosaïque d'images du satellite MODIS (250 mètres) 2-Image satellite LANDSAT (30 mètres) 3-Image de LANDSAT ETM7 (bandes 7-3-1; 30 mètres) 4-Image du Satellite ASTER (15 mètres)

beaucoup plus fine que celle des satellites géostationnaires. Ainsi, les dernières générations lancées atteignent des résolutions de l'ordre de la dizaine de mètres, voir du mètre. De plus, chaque satellite est conçu de manière à pouvoir enregistrer le rayonnement dans différentes bandes spectrales, ce qui permet de les utiliser sur une très grande diversité d'objet (neige, végétation, eau,...). Les satellites de ce types les plus connus sont par exemple : Spot, Landsat, Ikonos, Aster, Quickbird,...

En conclusion, ces satellites présentent une résolution spatiale adaptée à notre problématique d'échantillonnage à haute résolution spatiale. Cependant, leurs paramètres de répétitivité d'environ 15 jours ne nous permettent pas de les utiliser de manière systématique pour un suivi de l'enneigement par exemple. Toutefois, il peut être envisageable de les utiliser pour valider certaines données ou encore pour réaliser des extrapolations à partir de données locales.

2.3.1.2 Application des techniques satellitaires en milieu naturel :

Les domaines d'applications dans l'environnement des moyens satellitaires sont particulièrement vastes. Un rapide recensement de ces applications peut être réalisé, afin de déterminer les possibilités d'utilisations sur notre terrain d'étude, en terme de collecte de données.

a) Radars & Interférométrie :

Les techniques d'imageries radars sont particulièrement efficaces sur la glace, matérieux à structure "grumeleuse", qui permet d'obtenir des décalages de phases exploitables. Ainsi, il est possible avec ces techniques de suivre le déplacement des glaces en arctique par exemple. Ce suivi se fait de manière journalière par le service des ressources naturelles canadiens, permettant de sécuriser la navigation en période hivernale. Pour cela, ces services utilisent les satellites RSO ou RADARSAT qui produisent des images à faible résolution spatiale (1 à 50 kilomètres carrés) mais forte résolution temporelle (plusieurs images par jour).

Dans les zones montagneuses, la dynamique des glaciers est également étudiée par l'intermédiaire des satellites radars ([Trouvé, 2005, \[116\]](#)). Il est alors possible de suivre leur mouvement sans avoir recours à des campagnes GPS lourdes et quel que soit le temps, puisque la couverture nuageuse n'influence pas la mesure radar ([Petillot, 2007, \[97\]](#)).

b) Risques Naturels :

Dans le domaine des risques naturels, les applications de la télédétection sont multiples. Sans s'attarder sur le vaste éventail de possibilités d'utilisations dans le domaine des mouvements de terrains, du volcanisme ou de la sismologie, on pourra cependant retenir quelques

2.3. TECHNIQUES DE MESURE À DISTANCE :

techniques plus spécifiques aux zones de montagnes. Dans un contexte actuel de recul glaciaire important, la possibilité de formation de lac pro ou supra glaciaire entraîne des risques importants en cas de rupture pour les populations alentours. La cartographie de ces édifices récents est rendue possible par l'analyse d'images satellites et peut s'avérer particulièrement utile dans les zones de hautes montagnes ([Gay, 2005, \[44\]](#) ; [Kaar, 2003, \[65\]](#)), ou en Himalaya par exemple ([Petley, 2002, \[98\]](#), [Kargel, 2011, \[67\]](#)).

Dans le même temps, l'analyse des impacts d'une catastrophe naturelle peut également être étudiée par ce biais, à l'image de ce qui a été fait pour les récents tsunamis en Indonésie (2004) et au Japon (2011), mais cette fois-ci pour analyser l'étendue d'une crue, de glissements de terrains ou d'événements torrentiels ([Tralli, 2005, \[115\]](#)).

c) *Evolution climatique :*

Les marqueurs de l'évolution climatique sont très présents dans les zones de montagnes, en particulier par l'intermédiaire des glaciers, de la neige ou encore des limites des étages de végétation. Depuis la fin des années 70, les satellites présents en orbite ont permis de constituer une base de données extrêmement riche sur ces édifices. De fait, l'analyse de chroniques d'images permet non seulement d'observer en temps réel les évolutions glaciaires ([Konig, 2001, \[70\]](#)), mais également de les quantifier ([Paul, 2004, \[95\]](#)).

d) *Végétation :*

La végétation joue un rôle essentiel en hydrologie, d'une part au niveau de l'évapotranspiration, mais également dans les phénomènes de pédogenèse et d'infiltration qui ont une influence non négligeable sur le comportement des eaux de surface. De fait, le suivi de cette végétation, et notamment de la saisonnalité, revêt une importance toute particulière et est possible par l'intermédiaire des satellites d'observations ([Levin, 2007, \[73\]](#) ; [Cingolani, 2004, \[20\]](#)).

e) *Neige :*

La neige, élément saisonnier extrêmement variable spatialement, est depuis longtemps suivie par satellite. En effet, l'utilisation des différentes bandes spectrales permet de la détecter relativement aisément sur les images. Ainsi, le suivi de la couverture neigeuse arctique est depuis longtemps réalisé selon cette technique ([Mialon, 2005, \[83\]](#)). Avec les progrès en terme de résolution d'image, il est aujourd'hui possible d'utiliser les mêmes méthodes pour des bassins versants beaucoup plus restreints, ainsi que pour l'analyse du manteau neigeux et en particulier ses teneurs en eau ([Fily, 2002, \[41\]](#)). De plus, la complémentarité des appareils en terme de résolution spatiale et temporelle, permet de réaliser des suivis croisés qui augmentent considérablement les possibilités d'échantillonnages ([Hanich, 2004, \[52\]](#)).

f) *Occupation du sol :*

De la même manière que la végétation, la neige ou les glaciers, l'occupation du sol est un paramètre que l'on peut aisément suivre par satellite. L'évolution des urbanisations, et leurs effets sur l'environnement ou l'hydrologie peut alors être quantifiée par l'intermédiaire des images satellites ([Weng, 2001, \[99\]](#)).

g) *Humidité du sol :*

L'humidité du sol détient un rôle essentiel dans la quantification des ressources en eau à la surface de la planète. En effet, être capable de détecter depuis l'espace des zones potentiellement humides permet non seulement de mieux comprendre les mécanismes hydrologiques

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :

locaux, mais également de déterminer les zones d'exploitations potentielles. En montagne, ces zones humides sont très importantes, puisqu'elles constituent de petits réservoirs d'eau potable, mais également les zones de recharges principales de nappes plus profondes ou de déclenchement des événements de crues (*Nikolopoulos, 2010, [36]*). A plus grande échelle, l'humidité du sol renseigne ainsi sur l'état hydrologique des bassins versants (*Lakshmi, 1997, [71]* ; *Bales, 2006, [4]*).

Pour ce type de travail de télédétection, on utilise essentiellement des satellites radars à micro-ondes. Depuis quelques années, le Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère de Toulouse travaille sur un nouveau satellite (SMOS), dont l'objectif sera de mesurer et quantifier plus précisément l'état d'humidité de la surface du sol.

h) Températures :

Comme on l'a vu, la température de l'air en montagne est une grandeur particulièrement délicate à mesurer. Ainsi, obtenir un champ de températures uniquement à partir d'images satellites peut être très intéressant, en complément d'un réseau de mesures ponctuelles sur un versant (*Fily, 2002, [41]* ; *Haberl, 2010, [51]*). De telles techniques de mesures des champs de températures sont aujourd'hui en pleine expansion et commencent à donner les premiers résultats convaincants.

2.3.1.3 Application au bassin versant du Vorz :

Dans ce paragraphe, nous avons réalisé un bilan non-exhaustif des principales techniques d'imageries applicables à la montagne et cherché dans quelle mesure il serait possible de les utiliser pour compléter notre réseau. En outre, la détermination des limites et contraintes d'utilisations a mis en lumière les possibilités d'exploitation de ces données. Ainsi, il ressort que contrairement aux réseaux hydrométéorologiques classiques, les techniques satellitaires offrent une résolution spatiale satisfaisante pour les objectifs que nous poursuivons sur le bassin versant du Vorz. Cependant, il semble que la résolution temporelle est relativement limitée. En effet, nous allons étudier l'hydrométéorologie du versant et les phénomènes se produisant à une échelle infra-journalière, mais, les données satellites de résolution correcte ne sont malheureusement disponibles que tous les 8 à 15 jours (répétitivité pour 1 satellite ou un couple). Dans ce contexte, il semble évident que se priver de ces sources de données serait préjudiciable, mais, dans un même temps, elles ne présentent pas une résolution suffisante pour les intégrer au réseau de mesure. En conséquence, les données satellitaires seront utilisées avec parcimonie, en particulier dans la validation des données du réseau de mesure. Il est donc nécessaire de chercher de quelle manière on peut obtenir des données à forte résolution spatiale et temporelle, en particulier pour réaliser le suivi de la couverture neige qui joue un rôle clef dans l'hydrologie des bassins versants de montagne.

2.3.2 Techniques de télédétection nivologique :

D'après les observations, remarques et conclusions précédentes, l'utilisation de la télédétection sur les bassins versants de montagne pour étudier les processus hydrométéorologiques peut s'appliquer à plusieurs paramètres, mais, il en existe un particulier pour lequel cette technique est particulièrement efficace et utilisée depuis plusieurs années, il s'agit de l'étude du manteau neigeux. Nous allons ici nous attacher à présenter les techniques les plus répandues, et également montrer quels paramètres du manteau neigeux elles permettent d'analyser et quels sont les facteurs limitant leur utilisation.

2.3. TECHNIQUES DE MESURE À DISTANCE :

Il existe peu de stations d'observation à travers les massifs montagneux, et, cette contrainte nous oblige à chercher des moyens alternatifs et indirects pour trouver des informations et données sur ces zones. Les images satellites peuvent nous permettre dans certains cas d'accomplir cette tâche. La détermination de la couverture neigeuse peut ainsi être déterminée à l'aide de ces satellites, mais il est également possible d'obtenir des informations plus structurales tel que son contenu en eau ([Martini & Dedieu, 2006, \[78\]](#)), et ce, à différentes résolutions temporelles pour l'ensemble d'une saison ([Bewley, 2010, \[13\]](#)). Cette approche offre des avantages non-négligeables lorsque l'on étudie la couverture neigeuse et sa structure à grande échelle en particulier, puisqu'elle permet d'évaluer l'équivalent en eau stocké sous forme de neige dans les massifs montagneux, et d'anticiper quels seront les volumes disponibles lors de la fonte, pour une meilleure gestion des ressources en eau ou l'alimentation des réseaux hydroélectriques. Ces méthodes sont également utilisées dans l'observation des évolutions climatiques et leurs impacts sur les changements au niveau de la cryosphère ([Beniston, 2003 \[11\]](#)). Le grand avantage des images satellites comparées aux images traditionnelles (photographie numérique) est qu'elle disposent d'un large choix de bandes spectrales différentes permettant de choisir les plus adaptées à l'observation de différents paramètres. Ces bandes spectrales seront différentes selon que l'on étudie l'équivalent en eau ([Molotch, 2009, \[85\]](#); [Schaeffli & Hingray, 2005, \[104\]](#)) ou encore l'albédo de la couverture neigeuse d'une région ([Bales, 2006, \[4\]](#)). Cependant, cette approche par la télédétection comporte un certain nombre de facteurs limitants, notamment en terme d'échelle et de résolution temporelle, sur les bassins versants de montagne. De plus, l'achat d'images pour de fortes résolutions temporelles est relativement onéreux et il est difficilement envisageable de couvrir une saison entière au pas de temps journalier, et ce, même en ne tenant pas compte du temps de traitement considérable des images. La couverture nuageuse, bien souvent présente sur les massifs est un autre facteur limitant considérablement l'exploitation des images ([Gao, 2010, \[43\]](#)), puisqu'elle est susceptible de générer de nombreux masque sur le bassin versant étudié. Pour finir, la détection de la neige elle-même reste un challenge ([Farmer, 2010, \[40\]](#)), et ce, malgré la présence de différentes bandes spectrales. Finalement, l'utilisation de cette technique nécessite en permanence des compromis et des adaptations aux données disponibles. Par exemple, les satellites MODIS ou ceux équipés d'AVHRR disposent d'une faible résolution spatiale ($\Delta x_{min} = 250m$) au regard des reliefs de zones de montagnes particulièrement escarpés sur lesquels on observe de fortes variabilités spatio-temporelles ([Sirgue, 2009, \[108\]](#)). A l'inverse, les satellites à haute résolution spatiale ($\Delta x_{min} = 10 - 30m$) tel LANDSAT ([Dozier, 1989, \[32\]](#)) ne disposent eux, de part leurs paramètres orbitaux, que de répétitivités faible (8 à 15 jours), ce qui est peu au regard de la vitesse des dynamiques d'accumulation et des fontes de la couverture neigeuse dans notre cas ([Shaper, 1999, \[105\]](#); [Cline 1998, \[23\]](#)). Il est bien entendu possible d'utiliser la télédétection pour générer des données complémentaires, ou bien de manière alternative en cas d'absence de données essentiellement sur des bassins versants de taille convenable (environ $100 km^2$). Cependant, la résolution ne pourra être, à la fois, à haute résolution temporelle et spatiale, or, celle-ci est indispensable au forçage correct et précis des modélisations des processus hydrométéorologiques des bassins versants de montagne ([Bloschl, 1999, \[14\]](#)).

En conclusion, malgré l'efficacité des méthodes décrites précédemment, l'utilisation de la télédétection fait face à une limite infranchissable que représente la répétitivité assez faible (8 à 15 jours), au regard de la variabilité temporelle de la nivologie en montagne. De plus, la nécessité de données précises sur des surfaces plus limitées (quelques kilomètres carrés), requiert le recours à des techniques lourdes de télédétection. Ainsi, l'avènement de la photographie numérique et l'automatisation des processus de traitement associés a donné naissance à une

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :

nouvelle génération de capteurs basés sur les principes d'observations de la télédétection, à une échelle plus limitée qu'est celle du versant, à partir de points de vues terrestres.

2.3.3 Du satellite à la video-numérique :

A partir du principe d'observation à distance à des pas de temps réguliers via la détection, des systèmes alternatifs se sont développés ces dernières années. Les progrès dans le domaine de la photographie numérique sont en grande partie le moteur de ce développement. Il est aujourd'hui possible d'utiliser les nouveaux appareils photographiques en les laissant à demeure sur le terrain, de la même manière que cela est fait pour les satellites. On observe certes une zone plus limitée spatialement, mais, l'avantage réside ici dans la résolution spatiale (similaire voire même inférieure), et surtout, dans la résolution temporelle. Cette donnée dépend d'ailleurs uniquement des capacités de stockage de l'appareil, qui sont à l'heure actuelle en constante évolution. Au final, on obtient un capteur aussi efficace, voire même plus qu'un satellite, avec des résolutions spatiales (10 mètres) et temporelles (infra-journalières) convenables, couvrant des surfaces parfaitement adaptées à l'échelle de travail sur les petits bassins versants de montagne.

L'utilisation de la photographie ne s'est pas fait uniquement dans le domaine du suivi nivologique, et on y a recourt pour de nombreuses applications environnementales. Le suivi hydrométrique des rivières en est un bon exemple (*Fourquet, 2005 [42]* ; *Saulnier & Barth, 2009, [102]*) et est de plus en plus répandu (*Hauet, 2007 & 2009, [54], [53]*). L'observation des glaciers et de leur dynamique est également réalisée de cette manière, notamment au niveau des fronts glaciaires (*Kajuutti, 2003, [66]* ; *Moreau, 2008, [86]*) ou sur des surfaces plus importantes (*Griselin, 2005, [50]*).

La première utilisation des caméras à destination de la mesure et quantification de la couverture neigeuse a été réalisée dans les zones arctiques (*Christiansen 2001, [19]* ; *Hinkler 2005 & 2006, [55], [56]*) ou elle joue un rôle prépondérant dans l'évolution des végétations de toundra, et peu être utilisée comme marque de l'évolution climatique. Puis, par la suite, on a pu utiliser cette technique à destination de la quantification de la neige en zone urbaine (*Matheussen 2004, [79]*) et de ses impacts sur l'hydrologie de ces zones.

Enfin, la première utilisation de ce type d'imagerie en zone de montagne a eu lieu au début des années 2000. Au départ, l'objectif était de quantifier l'albédo de la neige (*Corripio 2002 & 2004, [25], [27], [26]*) sur de petites surfaces de l'ordre de quelques centaines de mètres carrés pour étudier les transformations à l'intérieur du manteau neigeux et le transport de la neige par le vent (Col du Lac Blanc, Grandes Rousses). Cette étude a nécessité la mise en place d'un traitement 3D, afin d'obtenir la transformation de l'image 2D vers le modèle 3D de ce qui est observé dans la réalité. Dans la continuité de ce travail, un équipement semblable a été installé sur un versant glaciaire, afin de réaliser un travail similaire de quantification de l'albédo en vu de l'intégration à un bilan de masse (*Dumont 2009 & 2010, [34], [33]*). Aujourd'hui, ce type d'équipement se développe de manière considérable sur plusieurs bassins versants de montagne, qu'ils soient glaciaires ou non. On trouve ainsi une grande variété de systèmes, d'un degré de complexité, d'automatisation et de capacités d'échantillonnages variables. De tels systèmes sont opérationnels en Suisse (*Farinotti 2009, [39]*) ou encore en France dans les massifs d'Anterne (*Barth 2010, [8]*) et Belledonne (*Barth, 2011, [9]*).

2.3.4 Perspectives futures :

A l'heure actuelle, les systèmes de détection automatique de la couverture neigeuse se développent et utilisent des moyens spécifiques. Il existe également des applications développées

2.3. TECHNIQUES DE MESURE À DISTANCE :

par les gestionnaires de domaines skiables (exemple de nombreuses webcam installées à demeure dans les Alpes). L'utilisation de ces réseaux (comme dans le Val d'Aoste par exemple : [Cremonese, 2011, \[28\]](#)) pourrait accroître de manière considérable les données pour le suivi nivologique. De même, sur des études plus limitées en terme de surface, il est également possible de placer des appareils photographiques pour compléter un ensemble d'instruments à haute résolution spatiale et temporelle ([Parlange et Nadeau, 2011, \[94\]](#)). Dans un domaine différent qu'est celui de la prévention des avalanches, les systèmes numériques commencent à être utilisés, notamment pour l'observation des phénomènes, et en particulier de leur dynamique d'écoulement. Un tel système a été développé par le Cemagref de Grenoble ([Thibert, 2011, \[110\]](#)) et permet grâce au principe de la stéréoscopie et de deux appareils photographiques, d'obtenir une image en 3D du nuage aérosol de l'avalanche à un pas de temps inférieur à une seconde et une résolution de quelques centimètres. Pour l'avenir, l'amélioration des capacités de stockage, mais surtout de la résolution des appareils pourrait permettre de développer encore les techniques existantes, notamment en terme de résolution 3D. Ainsi, lorsque la résolution sera suffisante pour obtenir sur l'ensemble d'un bassin versant des pixels de quelques centimètres de résolution, il sera possible par stéréoscopie d'analyser l'ensemble de la couverture neigeuse, et probablement de calculer en de nombreux points la hauteur de neige. Cet outil constituerait une avancée majeure dans la quantification des accumulations et fontes de neige, mais également dans la compréhension de mécanismes hydrologiques avec une meilleure estimation du contenu en eau de la neige, et de la dynamique de transformation du manteau neigeux.

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :

Section 2.4

Vers la mise en place d'un réseau local à forte densité :

2.4.1 Les bassins d'études expérimentaux :

Le bassin versant du Vorz a fait l'objet d'une étude pluridisciplinaire avant la mise en place du programme d'instrumentation et de modélisation. De fait, il est aujourd'hui relativement bien connu sous différents aspects (crues, morphologie, climat, géologie,...), et est devenu un des bassins versants expérimentaux du laboratoire EDYTEM. Il sera d'ailleurs ré-équipé pour un suivi sédimentologique du Lac Blanc au cours de l'année 2011. De tels bassins versants expérimentaux sont des mines d'informations pour l'hydrométéorologie de montagne ; ils permettent également de développer des capteurs innovants appelés à devenir des capteurs de référence pour certains d'entre eux. Nous allons ici présenter rapidement quelques bassins versants expérimentaux présent sur le territoire français et alpin. Toutefois, cette présentation ne se veut pas exhaustive et servira essentiellement à montrer de quelle manière l'équipement du Vorz s'inspire et se différencie de ces expériences.

2.4.1.1 Glacier de Saint-Sorlin :

Le glacier de Saint-Sorlin est l'un des bassins versants d'étude du LGGE destiné au suivi de l'évolution glaciaire et à l'établissement des bilans de masse (*Gerbaux, 2005, [45]*). Il bénéficie aujourd'hui d'une couverture temporelle conséquente, puisque les mesures ont débuté en 1956 (*Vincent et al. 2000, [121]*). A cette occasion, un des paramètres mesuré est l'albedo qui joue un rôle important dans la fonte ou la sublimation de la glace. Cependant, à l'image des contraintes auxquelles nous faisons face pour les températures ou la neige, soumises à de fortes variations spatiales et temporelles, il convenait d'utiliser un capteur adapté pour la mesurer. Pour cette raison un dispositif semblable à celui installé au Col du Lac Blanc a été développé et permet de suivre en continu l'albedo sur le glacier (*Corripio, 2004 ; Dumont, 2010, [27], [33]*).

2.4.1.2 Bassin versant de Sarenne :

Le bassin versant de Sarenne a été, l'un des premiers petits bassins versant glaciaires de montagne à être instrumenté de manière poussée, notamment par le CEMAGREF et EDF-DTG (*Martin et al., 1998, [77]*). Ainsi, depuis plus de 50 ans, des mesures de bilan de masses glaciaires sont pratiquées annuellement (*Valla 1999 & 1998 ; [118], [119]*). En outre, plusieurs études ont été menées, afin de réaliser des modélisations hydrologiques adaptées aux bassins versants de montagne en prenant en compte la nivologie (fonte des neiges), et le caractère glaciaire du bassin (*Durot, 1999, [35]*).

2.4.1.3 Lac d'Anterne :

A l'origine, le Lac d'Anterne n'était pas destiné à devenir un site d'études expérimentales sur la neige. En effet, l'objectif premier était d'étudier la sédimentation lacustre afin de mieux utiliser les archives naturelles pour déterminer les changements climatiques passés (*Giguet-Covex, 2010, [46]*) et l'évolution des usages et conditions pédologiques sur le bassin versant (*Arnaud, 2003, [3]*). Dans ce cadre, la neige étant susceptible de jouer un rôle dans les

2.4. VERS LA MISE EN PLACE D'UN RÉSEAU LOCAL À FORTE DENSITÉ :

processus de sédimentation, deux appareils photographiques ont été installés afin d'en observer l'évolution. Depuis 2007, on dispose donc d'une chronique de photographies qui a été utilisée dans le développement du système SnoDEC que nous présenterons dans la seconde partie de ce mémoire.

2.4.1.4 Col du Lac Blanc :

Le Col du Lac Blanc (2710 mètres), situé dans les Grandes Rousses à proximité de l'Alpe-d'Huez, fait l'objet depuis 15 ans d'une exploitation conjointe de plusieurs centres de recherches : le Cemagref et le CEN. Malgré tout, les objectifs sont communs et portent essentiellement sur la mesure et l'analyse des effets du transport de la neige par le vent ([Naaim, 1997](#), [\[87\]](#)) et sur les caractéristiques du manteau neigeux dans le cadre de son étude et de ses transformations ([Michaux, 2003](#), [\[84\]](#)). Sur ce bassin versant, le premier appareil de mesure de l'albédo basé sur la photographie a été développé à partir du début des années 2000 ([Corripio, 2002, 2004](#), [\[25\]](#), [\[27\]](#)). Outre ces appareils de mesure, l'épaisseur de neige (ultrasons), l'équivalent en eau (pluviomètre chauffant) et la température sont également suivis au niveau du col.

2.4.1.5 Site d'avalanche du Lautaret :

Le Cemagref utilise le site du Col du Lautaret (2058 mètres) depuis 1972 pour étudier le comportement des avalanches, par le biais de déclenchements volontaires par Gazex et Catex ([Thibert, 2007](#), [\[112\]](#)). Les objectifs sont de comprendre les mécanismes de déclenchement et d'écoulement des avalanches ([Granada, 1995](#), [\[49\]](#)). Dans ce cadre, l'observation des avalanches en temps réel est indispensable et divers systèmes de mesures ont été développés ([Marco, 1995](#), [\[75\]](#)). Ainsi, la dernière génération de capteurs repose sur l'utilisation d'appareils photographiques et de la stéréographie. Deux appareils, disposés de part et d'autre du vallon, filment le développement des avalanches, et, le dispositif est capable de reconstituer le modèle 3D du nuage aérosol ou de la coulée ([Thibert, 2011](#), [\[110\]](#)).

2.4.1.6 Bassins versants étrangers :

A proximité directe de ces bassins versants expérimentaux français, on notera la présence de trois sites particulièrement instrumentés en ce qui concerne l'hydrologie de montagne. Tout d'abord, le WSL (Institut pour l'étude de la neige et des avalanches, SLF) de Davos possède un réseau de mesures conséquent et l'utilise pour mettre au point des modèles nivologiques et hydrologiques appliqués à la montagne et à la prévention des avalanches ([Bavay, 2011](#), [\[80\]](#)). Plus récemment, un site d'étude géré par l'ETHZ de Zurich a vu le jour dans la station de Zermatt, avec pour objectif d'étudier les précipitations à de très fines échelles spatiales ([Schappi, 2011](#), [\[17\]](#)).

Enfin, le site de La Fouly, développé par le laboratoire EFLUM de l'EPFL de Lausanne, possède plus de 30 stations de mesures météorologiques sur un bassin versant d'une vingtaine de kilomètres carrés, et utilise ce réseau pour étudier la micro-météorologie (vent de pentes, températures,...) et l'hydrologie de montagne ([Parlange, 2011](#), [\[94\]](#) ; [Simoni et al., 2011](#), [\[107\]](#)).

Ainsi, on constate au regard de ces différents exemples de bassins versants expérimentaux une continuité dans la mesure de l'hydrométéorologie, et ce au travers d'une grande pluridisciplinarité. En outre ces bassins versants présentent de fortes similitudes d'instrumentation

CHAPITRE 2. ETAT DE L'ART DE LA MESURE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN MONTAGNE :

et s'inscrivent dans la continuité de l'évolution des réseaux hydrométéorologiques. Nous nous sommes inspirés de ces expériences, mais, afin de remédier aux problèmes et lacunes qu'elles ont soulevées et mis en évidence, il fut nécessaire d'innover pour mettre en place notre réseau.

2.4.2 Application au Vorz :

La problématique d'instrumentation peut être résumée par l'utilisation de capteurs robustes, les plus précis possibles, disposés de manière à représenter l'hétérogénéité spatiale et temporelle du milieu en étant accessible et fonctionnant de manière autonome, le tout, en conservant un coût raisonnable. Telle est donc l'équation à résoudre pour une modélisation adaptée et représentative, en vue de comprendre l'hydrodynamisme en montagne, et de proposer une modélisation cohérente et réaliste. Les différents points abordés ont mis en avant le large panel de techniques instrumentales actuelles disponibles pour entreprendre cette tâche. Il convient maintenant de déterminer la technique que nous allons adopter pour mettre en place une instrumentation sur le bassin versant du vorz.

Dans un premier temps, il apparaît au travers des diverses expériences de monitoring, que celui-ci ne peut se faire sur un unique paramètre et par l'intermédiaire d'un seul capteur, en particulier en montagne. Ainsi, nous avons donc choisi de nous orienter pour le Vorz vers un réseau d'instruments ponctuels permettant d'échantillonner au maximum l'hétérogénéité du bassin versant. Il était nécessaire de disposer de capteurs peu onéreux et à forte résolution temporelle. Dans ce cadre, le choix des paramètres à instrumenter s'est porté sur ceux qui sont incontournables en modélisation hydrologique, mais également sur ceux qui peuvent nous apporter des informations très contraignantes pour les modèles, telles que la présence de neige. En conséquence, nous nous sommes orientés vers la mise en place d'un réseau à 3 composantes principales : l'hydrométrie, la météorologie et la nivologie.

2.4.2.1 L'hydrométrie :

L'objectif des mesures hydrométriques était double à l'origine de ce projet. D'une part, on cherchait à quantifier les débits du torrent du Vorz, et, d'autre part on souhaitait en cas de crue pouvoir conserver un capteur opérationnel et observer son déroulement. Ainsi l'utilisation d'un capteur intrusif était inenvisageable et le choix s'est porté sur le capteur HyMAGE-TIP développé par G.Fourquet depuis 2005 (*Thèse G.Fourquet, [42]*). Ce capteur nous permet donc de suivre les débits du Vorz à partir d'une caméra qui détermine la hauteur du torrent et en calcul le débit toutes les 5 minutes. Autre point important, ce capteur est relativement bon marché (environ 2000 euros), et était potentiellement installable sur le bassin versant à la hauteur d'une prise d'eau pour disposer d'une alimentation électrique.

2.4.2.2 La météorologie :

La météorologie est certainement le paramètre le plus complexe et le plus variable à mesurer sur le bassin versant du Vorz. Dans un premier temps, la mesure de la pluie nous a semblé indispensable, notamment lors d'épisodes intenses, au vu de la distance à laquelle on se trouve de la station la plus proche climatiquement, à savoir celle de Chamrousse. Ensuite, il est apparu que la détermination correcte et précise du champ de température, était le facteur le plus important puisqu'il gouvernait le comportement hydrologique du bassin versant, avec la présence 6 à 8 mois dans l'année d'un manteau neigeux important.

2.4. VERS LA MISE EN PLACE D'UN RÉSEAU LOCAL À FORTE DENSITÉ :

a) *La pluviométrie :*

Afin de déterminer une éventuelle variabilité de la répartition des pluies sur le bassin, ce qui est le cas en zone de montagne à fort relief, nous avons décidé d'installer 3 pluviomètres classiques en plusieurs points d'altitude croissante, afin de calculer un éventuel gradient orographique. Associés à ces pluviomètres des capteurs de températures permettent de distinguer au premier abord les épisodes neigeux des épisodes pluvieux, puisque les pluviomètres étant non-chauffant (impossibilité de fournir de l'énergie pour le système de chauffage), ils sont inefficaces en cas de neige.

L'inefficacité des pluviomètres lors des précipitations neigeuses nous a conduit à installer à proximité de ces stations un dispositif permettant d'appréhender l'importance de ces événements au cours de la saison. Ainsi, il a été mis en places 3 totalisateurs qui permettront de connaître les quantités de neige tombées sur le versant.

b) *Les températures :*

La mesure des températures s'est faite en trois points du bassin versant via des stations météorologiques classiques. Cependant, il est illusoire de vouloir connaître le champ des températures sur le bassin à partir de ces trois seules stations. Afin de compléter ces mesures, nous avons installé des capteurs miniatures à forte résolution temporelle sur l'ensemble du bassin (iButton). Ces capteurs sont au nombre de 26 dans l'air et 15 dans le sol. A partir de ceux-ci, il sera possible de mettre en évidence des tendances altitudinales ou spatiales (exposition, pente,...) qui nous permettront de réaliser des interpolations mathématiques de celles-ci. Conscient des erreurs de mesures potentielles de ces capteurs, comparés aux stations classiques, un capteur de recallage est installé au niveau de chaque station, et, il sera ainsi possible de travailler de manière relative entre les capteurs, tout en recalant le système sur des points de précision connue.

L'ensemble de ces installations respectent le contrat initial qui est d'instrumenter avec un bon échantillonnage spatial et temporel, tout en limitant les coûts engendrés par ces installations, ainsi que leur consommation énergétique.

2.4.2.3 La nivologie :

Le dernier paramètre incontournable du versant est le stockage de l'eau sous forme de neige et glace pendant une grande partie de l'année. Nous avons vu au cours des paragraphes précédents que la neige est un matériau extrêmement hétérogène dans sa structure spatiale, mais également interne (couches dans le manteau neigeux). Il en ressort que l'échantillonnage puis l'extrapolation de cette variable est complexe à réaliser de manière précise. Afin d'obtenir des données exploitables pour ce paramètre, il a été envisagé de ne travailler que sur sa présence ou non à la surface du bassin, permettant ainsi de contraindre un modèle de stockage de neige, pour en déduire les quantités d'eau disponibles dans le manteau neigeux. De fait, pour instrumenter, il suffisait de choisir un instrument permettant d'obtenir de fortes résolutions à la fois spatiales et temporelles. Cependant, il a été mis en évidence précédemment que ce type de capteur n'était pas disponible sur le marché. Ainsi, une grande partie du travail réalisé durant cette thèse a porté sur le développement d'un capteur nivologique permettant de détecter de façon journalière au minimum (l'objectif de quelques heures étant possible) la présence ou non de neige sur le versant. Ce capteur sera présenté dans la seconde partie de ce mémoire.

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 2 :

Au cours de ce chapitre, nous avons vu que les bassins versants de montagnes sont caractérisés par des très fortes variabilités spatiales et temporelles. Il existe de nombreuses techniques permettant de mesurer cette variabilité, soit spatialement, soit temporellement. Ainsi, outre les techniques de mesures hydrométéorologiques traditionnelles (pluviomètres, thermomètres, hydrométrie,...), les techniques indirectes permettant d'observer et mesurer ces phénomènes à distance (satellite, télédétection,...) sont aujourd'hui très développées et efficaces, complétant les réseaux déjà en place. Cependant, il reste difficile de trouver une technique de télédétection mesurant directement l'ensemble des variabilités spatiales et temporelles.

Ces dernières années, les techniques d'imageries grand public se sont considérablement développées, si bien qu'il est aujourd'hui envisageable de les employer pour palier au manque de représentativité temporelle de certaines techniques, tout en conservant une excellente résolution spatiale.

En conséquence, il apparaît que le réseau de mesure développé sur le Vorz devra se montrer innovant, afin de répondre aux objectifs de haute résolution spatiale et temporelle que nous nous sommes fixés. En ce sens, nous avons donc développé un réseau de mesure spécifique, composés de plusieurs types de capteurs, permettant un multi-échantillonnage spatio-temporelle efficace sur le bassin versant.

L'intégralité de la mise en place du plan d'instrumentation a été réalisée en gardant à l'esprit les contraintes d'échantillonnages spatiales et temporelles, tout en associant une contrainte de coût à tous ces équipements. Ont été installés :

- 3 stations météorologiques classiques (température, précipitation, pyranomètre)*
- 3 totalisateurs*
- 40 capteurs de température miniatures*
- 2 appareils photos pour observer la neige*

Ce plan d'instrumentation a permis d'observer le bassin versant en continu depuis Octobre 2009, et de mieux le comprendre pour le modéliser, en respectant la règle : "Pour bien modéliser un bassin versant de montagne, il faut le connaître et l'instrumenter localement".

2.4. VERS LA MISE EN PLACE D'UN RÉSEAU LOCAL À FORTE DENSITÉ :

Chapitre 3:

Réseau de mesure à multi-échantillonnage :

Sommaire du Chapitre:

3.1 Etude de la variabilité spatio-temporelle et topographique du bassin versant :	77
3.1.1 Variabilité morphologique :	77
3.1.2 Variabilité spatio-temporelle :	82
3.1.3 Multi-échantillonnage spatio-temporel, un concept d'instrumentation innovant :	85
3.2 Instrumentation Météorologique :	88
3.2.1 Un plan original d'instrumentation météorologique :	88
3.2.2 Stations météorologiques :	88
3.2.3 Mesures pluviométriques sur le Vorz	94
3.2.4 Le réseau de iButtons :	95
3.3 Mesures Hydrométriques :	102
3.3.1 Le capteur IMAGINE :	102
3.3.2 Le capteur IMAGINE sur le Vorz :	103
3.4 Mesures Nivologiques :	105
3.4.1 Nécessité de la création d'un capteur nivologique original :	105
3.4.2 Mise en place et principe du capteur nivologique :	106

Introduction du Chapitre 3 :

Le chapitre précédent nous a montré que l'instrumentation en milieu de montagne était une tâche ardue, et qu'il semblait être bénéfique d'utiliser des réseaux particuliers afin d'instrumenter de manière représentative la météorologie et l'hydrologie. Dans le même temps, nous avons mis en évidence une forte hétérogénéité météorologique et morphologique. Nous allons voir ici comment s'exprime cette hétérogénéité, puis montrer de quelle manière nous avons choisi de la mesurer. Notre objectif étant ici de travailler à haute résolution spatiale et temporelle, nous allons mettre au point un réseau d'instrumentation, capable de palier aux faiblesses des différentes techniques dont nous disposons. En effet, les mesures issues des techniques d'instrumentations directes (sondes de températures, pluviomètres,...) ne sont pas suffisantes pour caractériser les variabilités spatiales que l'on observe en montagne. Dans le même temps, il ressort des études bibliographiques que les techniques indirectes (satellites en particulier) ne sont pas adaptées en terme de résolution temporelle. En conséquence, un réseau innovant, conjuguant différentes techniques de mesures, développant de nouveaux procédés au coût limité peu gourmands en énergie et permettant un échantillonnage ponctuel très dense, a été mis en place sur le bassin versant du Vorz.

Ce réseau est construit autour de 3 composantes principales qui caractérisent l'hydrométéorologie de montagne. Pour chacune de ces composantes, des capteurs ont été installés, adaptés et développés sur le Vorz. En premier lieu, l'hydrométrie a été instrumentée grâce à une technologie innovante reposant sur l'imagerie. Dans un second temps, un ensemble de capteurs météorologiques permet un multi-échantillonnage des caractéristiques climatiques sur le versant, au moyen de plusieurs instruments de résolutions et conceptions différentes. Enfin, les mesures nivologiques ont nécessité le développement d'un capteur spécifique et original permettant d'obtenir des hautes résolutions spatiales et temporelles.

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter les modalités de fonctionnement de ce réseau récent (opérationnel depuis fin 2009), ainsi que ses caractéristiques et spécificités comparées aux réseaux traditionnels.

Section 3.1

Etude de la variabilité spatio-temporelle et topographique du bassin versant :

3.1.1 Variabilité morphologique :

Toute étude d'un bassin versant de montagne est confrontée au problème du relief qui peut par endroit être particulièrement tourmenté. Pour quantifier les disparités topographiques sur le Vorz, nous allons nous baser sur les 3 principales dimensions : l'altitude, l'exposition et la pente.

3.1.1.1 Etagement altitudinal du bassin versant :

L'altitude est un paramètre essentiel à prendre en compte en montagne. En effet, elle est responsable des disparités thermiques (gradient thermique), pluviométriques (gradient orographique), nivologiques (gradient de fonte). La répartition des altitudes sur le bassin versant joue un rôle prépondérant dans son comportement hydrométéorologique, puisque l'ensemble des paramètres de modélisation sont sensibles à cette variable.

Le bassin versant du Vorz culmine à 2977 mètres (Grand Pic de belledonne) et descend jusqu'au village de La Gorge à 740 mètres, soit plus de 2000 mètres de dénivelée. Le long de ses versants, les écarts thermiques sont relativement importants, soit par gradient décroissant en situation normale, soit plus rarement par gradient croissant, lors des inversions thermiques notamment en hiver ou au début du printemps.

Lorsque l'on observe attentivement la répartition des altitudes sur le bassin (*cf. fig.3.1*), on constate que celles-ci sont réparties de manière assez homogène sur l'ensemble de la surface, en dehors des parties sommitales. Le graphique 3.2 permet d'observer cette tendance.. Cette particularité du bassin entraîne un fort étagement du comportement hydrométéorologique, puisque les variations d'altitudes sont relativement importantes, et évoluent sur l'ensemble de la surface du bassin. Il est à noter que l'altitude moyenne est située à 1700 mètres, soit approximativement au centre de celui-ci confirmant ainsi sa relative homogénéité.

3.1.1.2 Contrastes d'orientation sur le bassin :

A partir des paramètres d'altitudes, on peut déterminer l'étagement du bassin versant, son orientation, et mettre en évidence sa grande variabilité spatiale. Il est ainsi possible de distinguer des comportements différents d'un versant à l'autre en fonction, par exemple de l'exposition, qui engendre des phénomènes particulièrement marquants, comme les différences de fonte de neige au printemps par exemple (contraste nord/sud) ou encore les contrastes thermiques liés aux effets d'ombrages des sommets. La carte 3.3 met en évidence cette forte variabilité spatiale sur le bassin versant.

La particularité la plus remarquable est le contraste entre les orientations nord et sud, par rapport à l'axe du torrent du Vorz. On observe ainsi une différence très marquée entre la rive droite du Vorz orientée plutôt S-SW et la rive gauche orientée N-NE. A l'intérieur de chacune de ces divisions, la présence de vallons différents (Mine de Fer, Roche noir, Sitre,...) est clairement marquée avec parfois des expositions opposées à la tendance générale. Cette particularité entraîne dans de nombreux cas une dualité du comportement hydrologique et thermique, avec la coexistence lors d'un même pas de temps d'états radicalement opposés :

3.1. ETUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE ET TOPOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT :

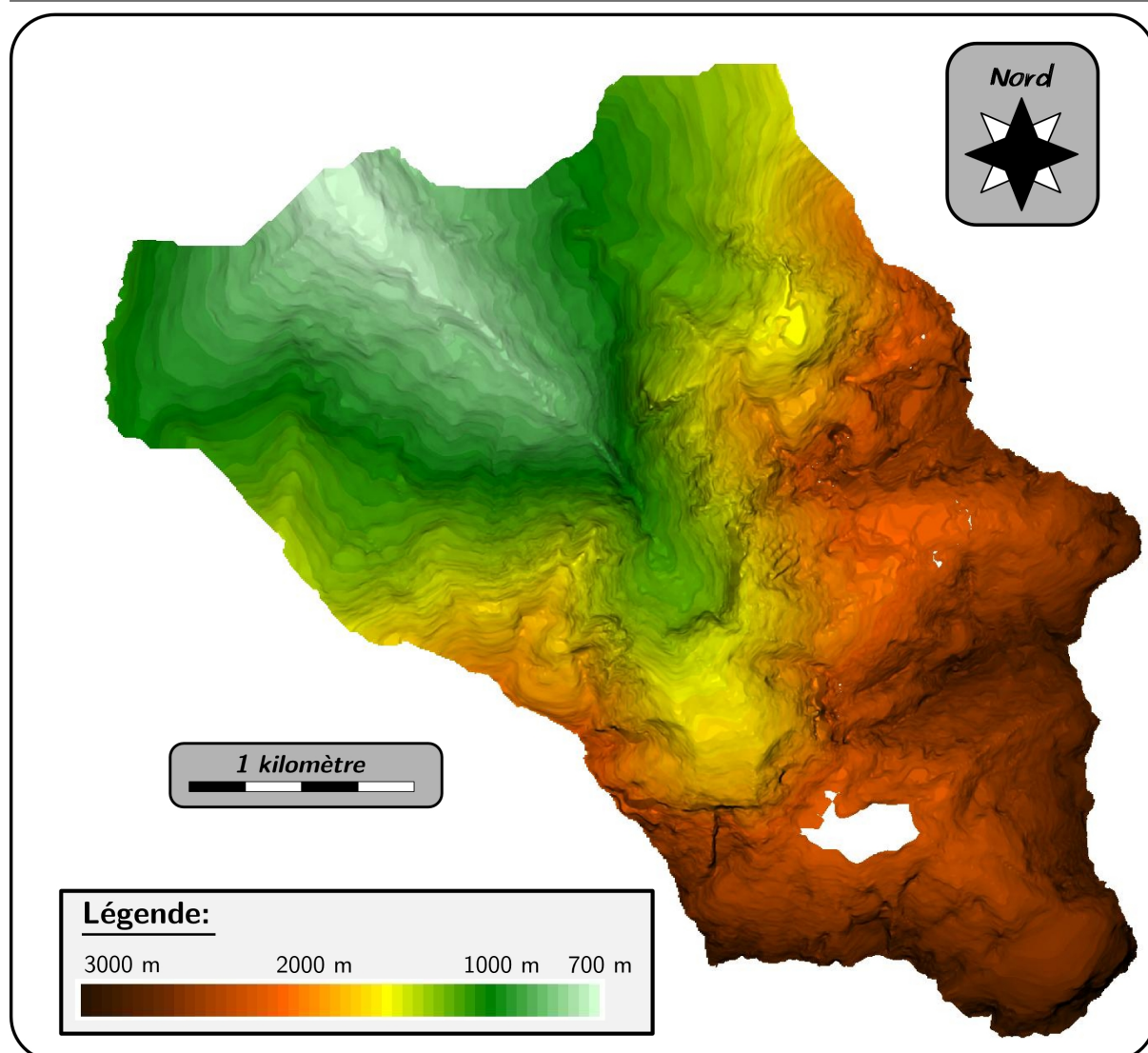


FIG. 3.1: Carte des altitudes du bassin versant du Vorz

fonte des neiges versant sud, gel versant nord, absence de soleil pendant les journées d'hiver.

Lorsque l'on regarde de plus près la répartition générale des expositions (cf fig.3.4), on met en évidence l'axe NW-SE formé par le torrent du Vorz et séparant le bassin en deux parties distinctes. Ce graphique met également en avant le faible nombre de zones orientées vers le sud et l'ouest qui sont par définition les expositions sur lesquelles le soleil a le plus d'impacts (après-midi et soirée). Ainsi, le bassin est orienté essentiellement au nord (60%) et à l'ouest (20%), ce qui lui confère un climat particulièrement froid, en particulier en hiver. D'après cette première analyse des expositions, on peut dire que l'on est en présence d'un bassin versant de montagne dont les conditions climatiques compte tenu des orientations auront une tendance froide. Les conséquences directes en terme de nivologie et de régime hydrologique sont d'ailleurs aisément observables avec ; des fontes des neiges tardives, des débits de fonte décalés vers la fin du printemps, et un étiage hivernal plus précoce et marqué que sur les versants sud du massif de la Chartreuse qui fait face au massif de Belledonne.

CHAPITRE 3. RÉSEAU DE MESURE À MULTI-ÉCHANTILLONNAGE :

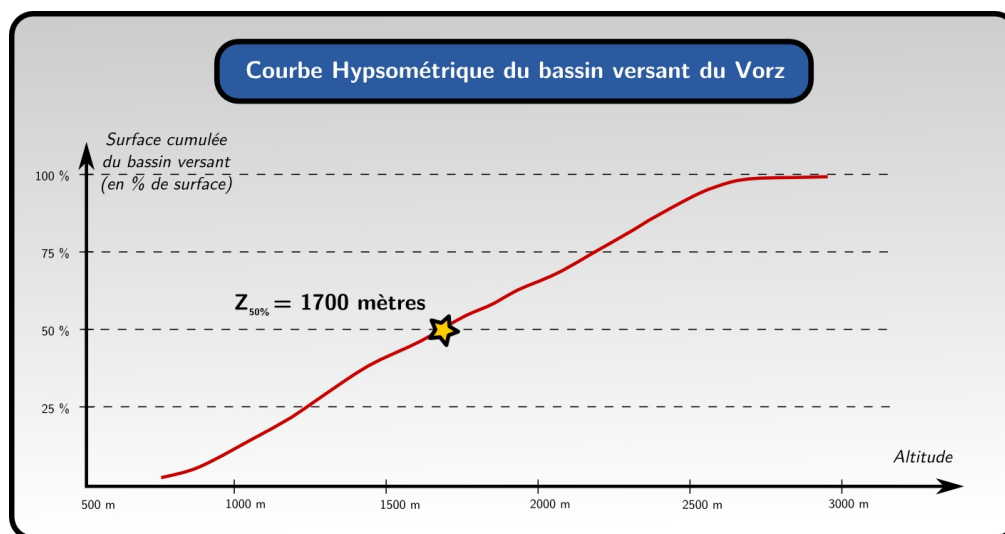


FIG. 3.2: Courbe hypsométrique du bassin versant du Vorz

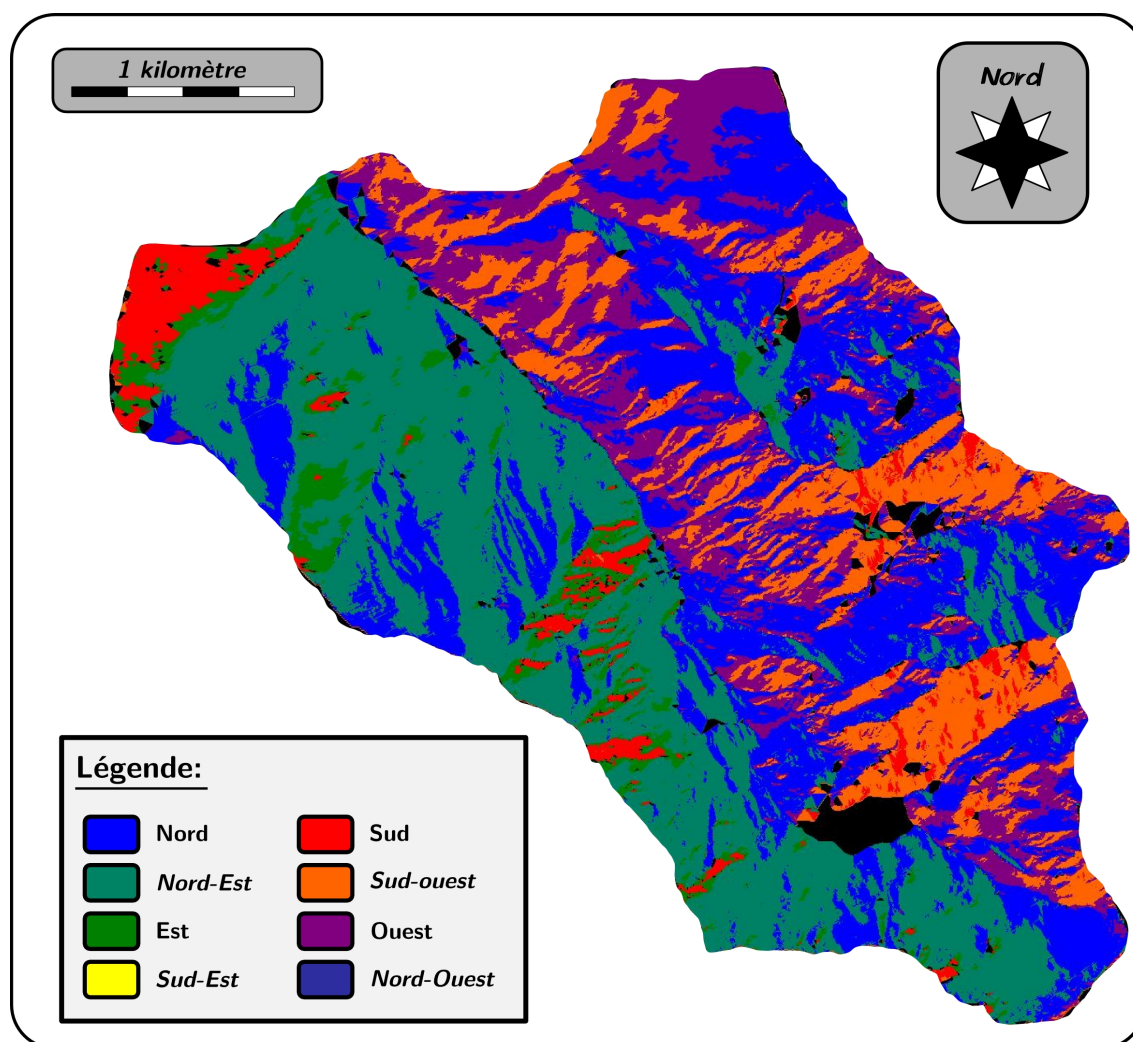


FIG. 3.3: Carte des expositions du bassin versant du Vorz

3.1. ETUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE ET TOPOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT :

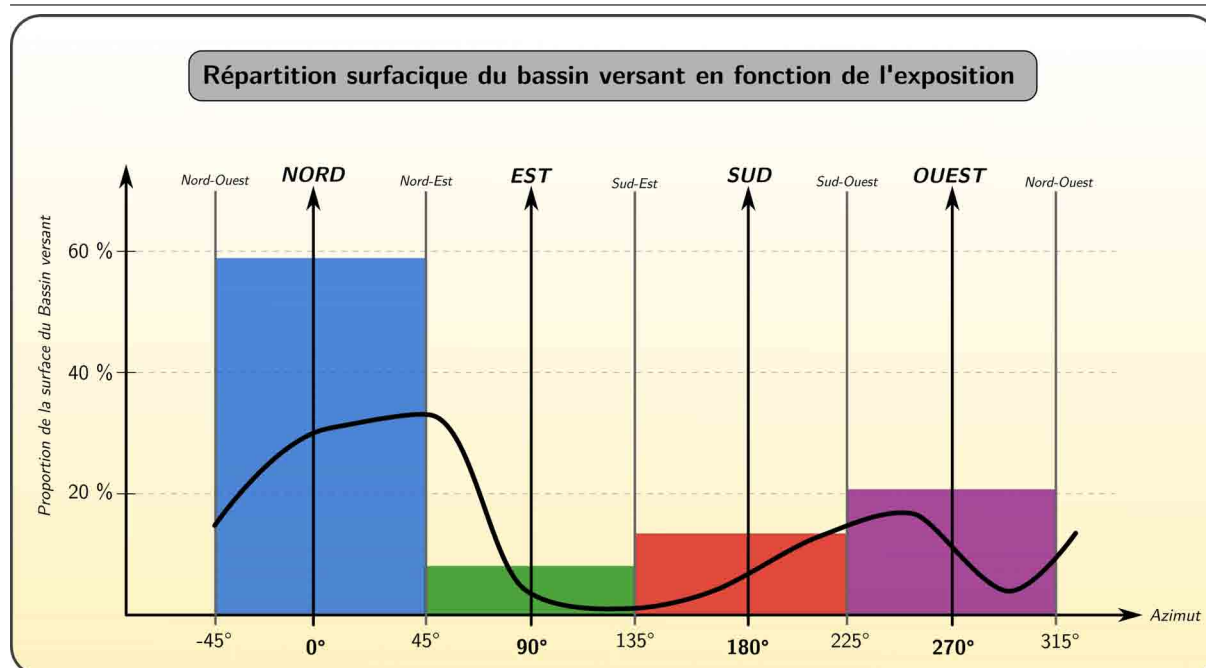


FIG. 3.4: Répartition des expositions sur le Vorz

3.1.1.3 Variabilité des pentes :

La pente joue un rôle moindre que les deux précédents paramètres sur le comportement hydro-climatique des bassins versants. Malgré tout, elle peut avoir une certaine importance en météorologie, lors par exemple du développement des vents thermiques montagnards (adiabatiques et catabatiques), ou lors d'épisodes perturbés par des circulations rapides de masses d'air le long de celles-ci. Bien que ce rôle reste mineur sur le comportement général du bassin, il est capable d'agir par le biais d'autres leviers. Ainsi, l'accumulation et la stabilité de la neige est particulièrement sensible à la pente, et, cela peut avoir un effet très important sur les stocks d'eau présents dans le manteau neigeux, notamment si de grandes proportions du bassin versant présentent de fortes pentes. De même le rôle hydrologique joué par la pente est essentiel, puisqu'elle détermine en grande partie les capacités de ruissellement à la surface du bassin, ainsi que le temps de réponse et de concentration à un évènement pluvieux.

La carte 3.5 soulève une concentration des fortes pentes dans la partie haute du bassin. La partie basse quant à elle est formée de terrains moins pentés, correspondant à la transition géologique mentionnée au premier chapitre. On relève en observant attentivement le profil du Vorz, le découpage du bassin en une succession de ressauts (verrous rocheux) et replats. Cette configuration assez facilement vérifiable lorsque l'on évolue sur le bassin a pour effet hydrologique la présence de zones à fortes pentes où les terrains sont érodés de manière importante, auxquels succèdent des replats entraînant le dépôt du matériel torrentiel, et la formation de cônes de déjection (lac Blanc, Mousset, Pleyne, La Gorge).

L'essentiel des fortes pentes est, quant à lui, situé sur les parties hautes du massif et entraîne à cet endroit la concentration d'ébouillis de pieds de pente, et, en hiver la formation de couloirs d'avalanches importants. Ainsi, la neige n'est que peu présente dans ces zones où l'accumulation sur les falaises et escarpements rocheux est difficilement possible.

La figure 3.6 résume de manière intéressante ce qu'il est possible d'observer sur la carte. On représente l'évolution des pentes moyennes en fonction de l'altitude sur l'ensemble du bas-

CHAPITRE 3. RÉSEAU DE MESURE À MULTI-ÉCHANTILLONNAGE :

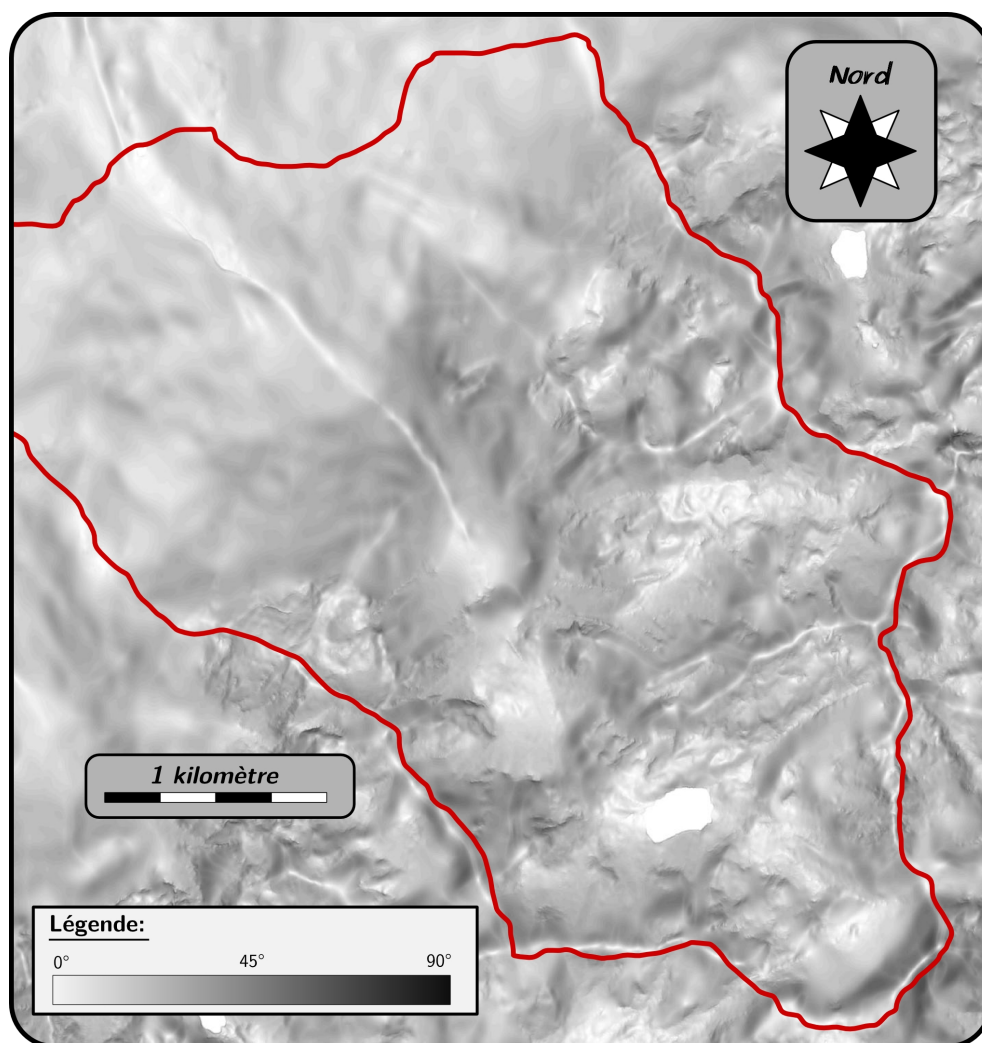


FIG. 3.5: Carte des pentes du bassin versant du Vorz

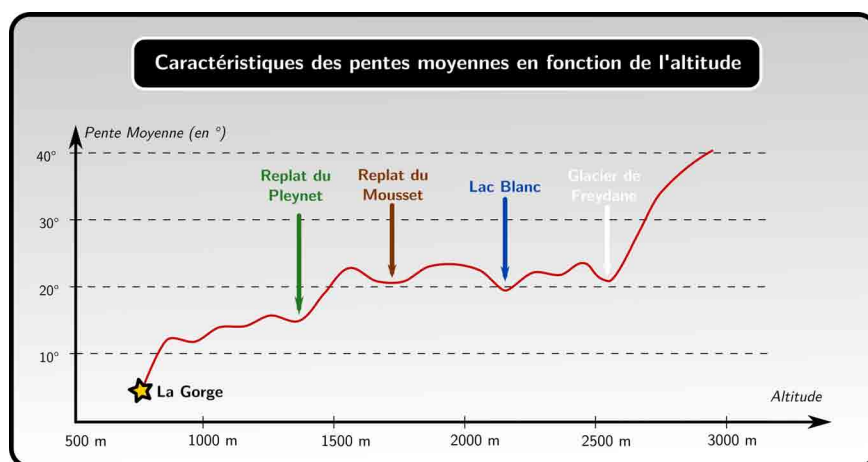


FIG. 3.6: Répartition des pentes sur le Vorz

3.1. ETUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE ET TOPOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT :

sin. On met ainsi en évidence la présence de faibles pentes dans la partie basse, aux environs de Sainte-Agnès. Ensuite, les pentes deviennent plus importantes lorsque l'on monte sur le bassin, pour atteindre un maximum au niveau des sommets du massif. Cependant, on notera l'existence sur cette courbe de 4 zones décroissantes en terme de valeur de pente, qui correspondent à des replats locaux, en l'occurrence la succession des verrous et replats que nous venons d'évoquer : Pleynet (1300 mètres), Mousset (1700 mètres), Lac Blanc (2100 mètres).

3.1.2 Variabilité spatio-temporelle :

3.1.2.1 Le couplage Espace-Temps :

La variation spatiale est très importante sur le Vorz. Dans le même temps, les conditions météorologiques changent généralement de manière importante au cours de l'année hydrologique, avec souvent des contrastes beaucoup plus marqués qu'en plaine. En conséquence, la difficulté de compréhension et d'observation du système se complexifie une nouvelle fois lorsque l'on ajoute le couplage entre ces deux variables. En effet, si la position sur le bassin a un impact sur les conditions s'y développant, la période à laquelle on s'y trouve joue également un rôle, essentiellement au niveau hydrologique du fait de la présence d'un manteau neigeux. On trouve ainsi deux niveaux différents de variabilité : le premier au niveau journalier, l'autre au niveau saisonnier.

On pourrait penser que les niveaux les plus simples à comprendre et modéliser sont les pas de temps courts (journalier ou horaire). Bien au contraire, ceux-ci sont bien souvent les plus complexes à appréhender, notamment en raison des changements locaux souvent difficiles à quantifier, car ils évoluent de manière très rapide (couverture nuageuse, vent, ombre,...) et parfois imprévisible (orage, réverbération du soleil sur la neige,...). A l'inverse, pour les pas de temps long (saison, année), on assiste à un lissage de ces variations, et il en résulte un caractère moins chaotique des conditions de surface. Pour illustrer ces propos, nous allons nous appuyer sur un exemple simple : la fonte de la neige.

Considérons la modélisation des stocks de neige et la quantification de l'eau disponible pour les écoulements au printemps.

Plaçons nous dans un premier de temps à l'échelle journalière, voir même hebdomadaire. Pour connaître les quantités disponibles, il est nécessaire de connaître la température sur le bassin, à différentes altitudes et expositions, au cours de la journée ; ceci, afin de pouvoir calculer dans quelle mesure la neige pourra fondre et entraîner des pointes hydrologiques. Nous sommes devant un choix, soit réaliser une cartographie complète des températures, soit de simplifier en utilisant un gradient local. Par ailleurs, il est nécessaire de connaître le plus finement possible les zones ombragées plus protégées en terme de fonte, et, les zones exposées au soleil. La complexité est de nouveau renforcée si on ajoute une variation climatique à cette journée ou semaine, avec le passage d'une perturbation qu'il faut quantifier. Au final, la situation devient vite difficile à quantifier et il devient nécessaire de simplifier, voir de négliger certains mécanismes que l'on considère à tort ou à raison comme d'importance moindre.

Considérons maintenant les pas de temps saisonniers ou annuels. Pour la même tâche, les conditions météorologiques vont changer, mais, sur l'ensemble de la période, on va assister à un certain lissage des conditions. Ainsi, il sera possible de travailler à des échelles spatiales bien moins fines. Le découpage altitudinal du bassin versant sera probablement moins important, et, sur une saison complète, l'importance des orientations sera moindre, puisqu'au final, l'ensemble du manteau neigeux aura fondu. De même, si on considère souvent un gradient orographique pour les précipitations au cours d'un événement, les observations montrent que

CHAPITRE 3. RÉSEAU DE MESURE À MULTI-ÉCHANTILLONNAGE :

celui-ci n'est pas constant au cours du temps et donne parfois des résultats inattendus (comme nous le verrons dans les chapitres suivants). La quantification des pluies elle-même est simplifiée par ce changement d'échelle. En effet, même si au coeur d'un évènement on a parfois du mal à déterminer les hétérogénéités spatiales, elles finissent par se lisser sur des pas de temps plus importants. Au final, on obtiendra plus facilement les quantités d'eau disponibles, pour les écoulements, avec un moins grand nombre de paramètres.

Nous sommes ici face à un réel dilemme, classique en hydrométéorologie, puisque d'un côté, on est capable pour des longs pas de temps de quantifier assez pertinemment les différents flux s'écoulant sur le bassin versant, mais, d'un autre côté, cette résolution est bien souvent insuffisante à court terme. Dans notre cas, nous souhaitons justement travailler à cette échelle de pas de temps fin, ce qui entraîne l'ensemble des difficultés que nous avons présentées. Ici, c'est bien du couplage entre phénomènes de variabilités spatiales et de résolutions temporelles que viennent l'ensemble des problématiques auxquelles nous devons répondre.

3.1.2.2 Un exemple d'une journée sur le Vorz (24 Novembre 2009) :

Afin d'illustrer la manière dont laquelle les variations dont nous venons de parler se produisent sur le Vorz, nous allons nous focaliser sur une journée spécifique, celle du 24 Novembre 2009. Au cours de cette journée, nous avons réalisé une mission d'inspection des instruments météorologiques, et les conditions ont été très changeantes. Le matin, lors de notre départ, la limite pluie/neige se situait environ à 1400 mètres, tandis que le soir, celle-ci avait déjà reculé à plus de 1700 mètres, mettant en avant à la fois le caractère limité des chutes de neige, mais également le réchauffement conséquent qui s'en suivi. Les graphiques ci-dessous (fig. 3.7) montrent l'évolution des conditions météorologiques durant cette journée.

Au niveau des précipitations, on constate que celles-ci se déroulent durant la nuit, avant

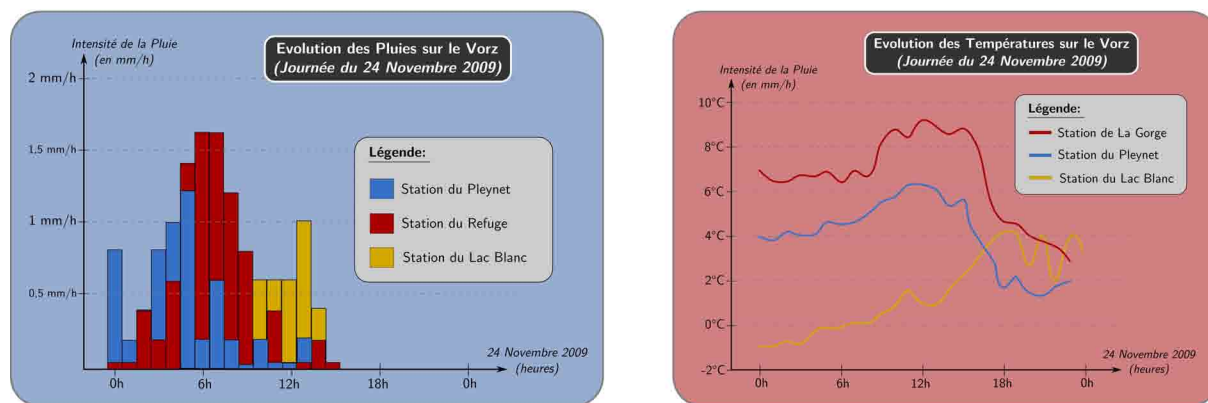


FIG. 3.7: Variations spatio-temporelles et évolutions des conditions météorologiques le 24 Novembre 2009

de s'atténuer au cours de la matinée. On notera que la station du Lac Blanc ne relève pas de précipitations sur cette période, cependant, elle mesure une pluie continue au cours de l'après-midi, qui est en réalité la fonte de la neige à l'intérieur du collecteur du pluviomètre. Il y a donc un épisode neigeux qui se déroule au début de cette journée, avant de se transformer en léger épisode de fonte pour les altitudes les plus basses.

Les températures enregistrées aux trois stations montrent, et ce même pour le Lac Blanc, des moyennes proches de 0°, sans toutefois descendre très bas, mais toujours dans la limite potentielle de la température seuil à laquelle on peut avoir accumulation de neige (0° à 3 – 5°).

3.1. ETUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE ET TOPOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT :

On assiste malgré tout à un relatif réchauffement au cours de l'après-midi.

Les photos de la figure 3.8 permettent d'apprécier l'évolution du temps sur le versant.



FIG. 3.8: Variations temporelles du type de temps et conditions réelles sur le Vorz le 24 Novembre 2009

Ainsi, si la matinée se déroule globalement sous le mauvais temps, la perturbation s'éloigne l'après-midi, offrant de belles éclaircies, en particulier au cours de la fin de journée. Cela permet d'expliquer l'arrêt des précipitations, mais également le début de la fonte observée et mesurée. En conséquence, on voit bien qu'à l'intérieur même d'une journée, les conditions évoluent radicalement (de la neige au soleil), parfois différemment d'un point à l'autre (refuge et lac,...). Ces changements ont un impact direct sur le manteau neigeux, et viennent renforcer les disparités déjà existante en raison de l'exposition.

La figure 3.9 montre de quelle manière le manteau neigeux se répartit sur le bassin à la fin de la journée, alors qu'il était présent sur l'ensemble du versant en fin de matinée. Pour les altitudes inférieures à 2200 mètres, celui-ci a disparu, notamment en versant sud (refuge).

CHAPITRE 3. RÉSEAU DE MESURE À MULTI-ÉCHANTILLONNAGE :



FIG. 3.9: Variabilité spatiale de l'enneigement le 24 Novembre 2009

Malgré tout, pour les orientations nord, dans certaines combes, on observe de la neige jusqu'à environ 1800-2000 mètres. Ce phénomène déjà complexe à modéliser à l'échelle d'une journée se répète tout au long de la saison et entraîne une complexité importante à la modélisation des conditions nivologiques.

3.1.3 Multi-échantillonnage spatio-temporel, un concept d'instrumentation innovant :

Comme cela a été abordé dans la conclusion du chapitre précédent, nous avons au cours de cette étude réalisé une instrumentation en montagne de manière nouvelle et innovante, en tirant partie des diverses techniques de mesure.

3.1.3.1 Génèse et application du concept d'instrumentation distribuée :

La variabilité spatio-temporelle est omniprésente sur notre bassin versant et cela est un réel facteur de difficultés. Dans le même temps, nous souhaitons aboutir à une modélisation relativement fine des processus hydrométéorologiques. En ce sens, nous avons dû réfléchir à la façon dont nous allions construire le réseau d'instrumentation. A cela, nous avons ajouté une contrainte supplémentaire : celle du coût des capteurs qui nous a considérablement limité dans les possibilités d'instrumentation, au regard de ce qu'il aurait été nécessaire d'entreprendre pour avoir un réseau haute-résolution. L'objectif de cette contrainte supplémentaire est de permettre de répéter l'expérience sur différents bassins versants, tout en conservant un coût d'instrumentation modéré.

En conséquence, nous avons construit une approche alternative en définissant le paramètre qui nous semblait le plus important et la technique d'instrumentation la plus adaptée. Nous en avons conclu que la température était l'élément clé et nécessitait de nombreux points de mesures à partir desquelles on pouvait travailler en relatif pour définir des gradients locaux. En ce sens, il ne suffisait que de quelques points de mesures précis (stations météorologiques classiques) pour nous recaler par rapport à des écarts relatifs. L'utilisation de capteurs miniatures de type iButton a été décidée du fait de leur faible coût et de la possibilité de constituer un réseau conséquent.

La mesure précise des quantités de précipitations locales doit également être considérée comme essentielle pour la quantification des épisodes pluvieux, avec une détermination de gradients orographiques. Pour cela, nous avons mis en place 3 pluviomètres non-chauffants permettant de réaliser cette tâche. Cependant, ceux-ci ne fonctionnant pas durant la période hivernale, nous avons choisi de confirmer les enregistrements à partir d'une station météorologique proche (Chamrousse), en validant les précipitations saisonnières à partir de totalisateurs à neige placés

3.1. ETUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE ET TOPOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT :

auprès des stations météorologiques.

Enfin, la neige semble être la variable la plus sensible du bassin, puisqu'elle contrôle l'essentiel de l'hydrologie. Il était donc indispensable de l'observer en continu (journalier) tout au long de la saison. Les différentes techniques détaillées au chapitre 2 ne nous donnant pas entière satisfaction, nous avons décidé de créer notre propre système de mesure.

En conclusion, notre approche peut se résumer de la manière suivante : nous instrumentons de manière ponctuelle et partielle (uniquement un ou deux type de paramètres mesurés), mais avec une résolution spatiale et temporelle à haute définition (journalière à horaire le plus souvent, voir minute). L'hypothèse de travail est que la richesse de cet échantillonnage va nous permettre de compenser le manque de mesures (pluie/neige) et de résolution (incertitude relative des capteurs de température iButton), sur certains paramètres du réseau, en contraignant de manière plus importante nos modèles nivologiques et hydrologiques.

3.1.3.2 Multi-échantillonnage sur le Vorz :

Le concept de multi-échantillonnage a été appliqué au bassin versant du Vorz. Nous avons acquis au cours du temps une relative expérience dans la mise en place de ce type de réseau pour un certain nombre de variables. Nous disposons d'une base de données de 2 années de mesures, à haute résolution spatiale et temporelle, nous permettant de mieux traiter le rôle des conditions locales et notamment du paramètre "altitude" dans la météorologie et l'hydrologie.

a) La température :

Concrètement sur le terrain, nous avons instrumenté de manière cohérente, en nous focalisant uniquement sur certaines caractéristiques. Nous avons donc disposé des capteurs, selon un maximum d'altitudes (de 900 à 2400 mètres) et d'expositions, en fonction de l'accessibilité des sites visés. Outre cet échantillonnage global, nous nous sommes focalisés sur certaines zones afin de déterminer la présence et l'impact d'éventuels courants thermiques le long des versants (importance de courant d'air provenant des vallées,...), ou encore de déterminer l'évolution des températures sur une zone donnée selon l'exposition, nous donnant ainsi accès à la course du soleil (capteurs à la même altitude selon un transect recouvrant plusieurs expositions).

b) Les précipitations :

Pour quantifier les précipitations, nous avons installé les stations à proximité des discontinuités morphologiques du système, à différentes altitudes. Les stations ont été placées de manière à refléter le climat en fonction des principaux ressauts rocheux (Pleyne, Mousset) et vallons (Lac Blanc). Cette disposition a pour objectif de permettre la détermination de gradients locaux lors des épisodes pluvieux, mais également de comparer ces gradients à ceux que l'on observe à l'échelle saisonnière, grâce à la présence de totalisateurs.

c) La neige :

Enfin, la neige a été suivie par l'intermédiaire de caméras (*cf. Seconde Partie du mémoire*). La contrainte de travail qui a été notre fil rouge au cours du développement du capteurs a été : "au moins une image par jour pour réaliser la cartographie journalière de la couverture nivale". Cependant, dans de nombreux cas, cette contrainte a été largement dépassée et nous disposons d'une résolution de 2 ou 3 heures, qui nous permet d'observer la fonte infra-journalière.

CHAPITRE 3. RÉSEAU DE MESURE À MULTI-ÉCHANTILLONNAGE :

Ces différentes techniques que nous avons développé ont abouti à la mise en place d'un réseau de mesure sur le Vorz, entièrement opérationnel depuis septembre/octobre 2009. Nous allons maintenant présenter et détailler les caractéristiques de ce réseau.

Instrumentation Météorologique :

Comme nous l'avons maintenant vu à plusieurs reprises, le réseau hydrométéorologique mis en place se compose de 3 éléments principaux :

- **Météorologie** : 3 Stations météorologiques
 - **Pluviométrie** : 3 Pluviomètres et totalisateurs
 - **Températures** : Environ 40 capteurs de températures disséminés sur le versant
- **Hydrométrie** : Caméra HyMAGE-TIP à la cabane du Pleynet
- **Nivologie** : Caméra SNODEC en deux points du bassin

Nous allons maintenant présenter l'installation de chacun d'entre eux sur le terrain à partir de Novembre 2008.

3.2.1 Un plan original d'instrumentation météorologique :

Dans le chapitre précédent, nous avons souligné que l'instrumentation partielle ponctuelle pourrait constituer une alternative intéressante, dans l'optique de l'évaluation de l'hydrologie et de la climatologie d'un bassin versant de montagne. La première section de ce chapitre met en évidence de fortes variabilités temporelles et spatiales sur le bassin, venant ainsi confirmer l'intérêt de cette technique. Notre philosophie est de réaliser un échantillonnage spatial ponctuel à forte densité sur l'ensemble du bassin. L'idée était de mieux contraindre la météorologie locale, de manière à pouvoir l'extrapoler plus facilement par des techniques simples, et un minimum d'incertitude sur les variables. En conséquence, il se révèle plus simple d'utiliser un échantillonnage à haute résolution pour générer des cartes météorologiques locales, que d'utiliser des stations, certes très précises, correspondant aux standards de la mesure (Météo-France,...), mais pour lesquelles le recours à des techniques plus complexes et des extrapolations parfois difficiles et peu précises est requis.

Au total sur le versant, nous avons équipé 22 sites. Sur chacun de ces sites, un capteur de température iButton (dans l'air et parfois dans le sol) est disposé, complétant parfois une station météorologique ou un appareil photographique. La taille du bassin versant est de 20km^2 à l'exutoire de la Gorge, tandis qu'à la hauteur du Pleynet, la taille du bassin est d'environ 10km^2 . De fait, la résolution du réseau est inférieure au kilomètre carré et nous confère une résolution spatiale très intéressante. Altitudinalement, le réseau s'échelonne entre 900 mètres et 2450 mètres. La carte suivante présente le plan général de l'instrumentation sur le bassin versant du Vorz (fig.3.10).

3.2.2 Stations météorologiques :

Les stations météorologiques constituent un élément essentiel dans le processus d'instrumentation. D'une part elles nous permettent de mesurer les variables classiques telles que la pluie, la température ou l'insolation, et, d'autre part, nous allons réaliser grâce à elles le recilage du réseau de iButtons. Notre volonté d'instrumenter de manière partielle ponctuelle, ainsi que les questions financières nous ont conduit à installer des stations basiques en 3 points du bassin versant. De fait, les pluviomètres ne seront pas chauffants et ils seront donc inexploitable durant la période hivernale. L'objectif étant essentiellement de mesurer des événements orageux afin de mieux comprendre leur déroulement.

Plan d'Instrumentation du Vorz

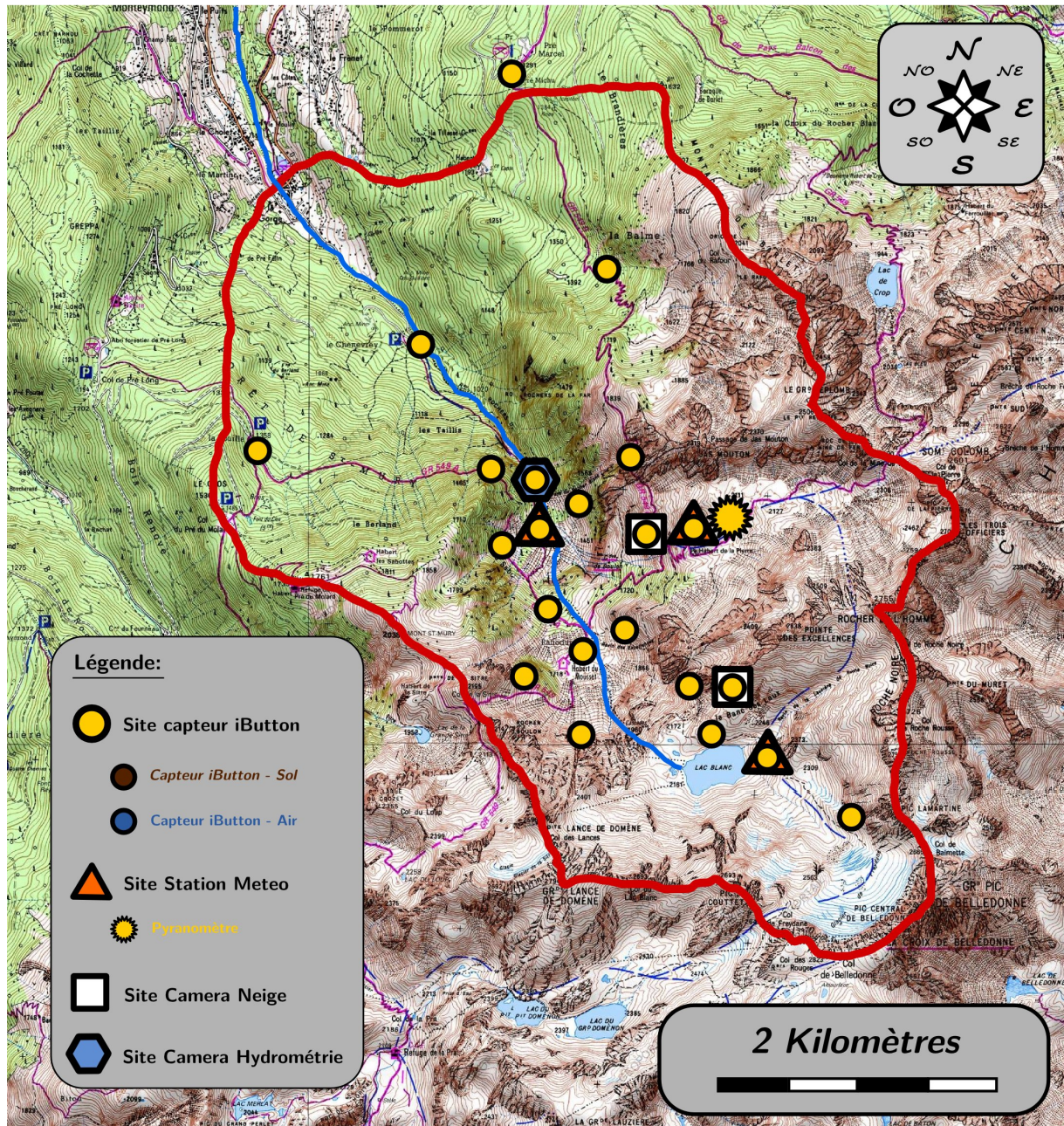


FIG. 3.10: Plan d'instrumentation du bassin versant du Vorz

3.2. INSTRUMENTATION MÉTÉOROLOGIQUE :

Les 3 stations installées sur le versant sont présentées succinctement dans le tableau 3.1.

Station	Altitude	Exposition	Instruments
Station du Pleynet	1360 mètres	Nord	Pluviomètre (<i>HOBO</i>) Sonde température (<i>HOBO</i>)
Station du Refuge Jean-Collet	2060 mètres	Ouest	Pluviomètre (<i>Campbell</i>) Sonde température (<i>Campbell</i>) Pyranomètre (<i>Campbell</i>)
Station du Lac Blanc	2230 mètres	Nord-ouest	Pluviomètre (<i>HOBO</i>) Sonde température (<i>HOBO</i>)

TAB. 3.1: Stations météorologiques et instruments disponibles sur le Vorz

Au niveau de chaque station, un iButton est positionné et permet de comparer la température "station" et la température "iButton". Ainsi, on pourra étudier les erreurs de mesures réalisées par les iButtons, et, les corriger à partir des différences des relevés. Ce point spécifique sera rediscuté dans la troisième partie du mémoire.

3.2.2.1 Station du Pleynet (1360 mètres) :

La station du Pleynet (cf fig.3.11) est installée au niveau d'un replat, à proximité du capteur de mesure hydrométrique, juste en amont de la Gorge dans laquelle s'est déclenchée la lave torrentielle de 2005. Située dans un vallon très encaissé à une altitude relativement peu élevée par rapport aux deux autres stations, elle nous permet de connaître les précipitations pour les faibles altitudes du bassin, mais également juste à l'entrée de celui-ci. Ainsi, il sera possible d'étudier la propagation des perturbations venant de la vallée sur la pluviométrie du bassin. La station se trouve dans un vallon très encaissé et de fait, ne reçoit que très peu d'ensoleillement direct. nous sommes ainsi dans une zone humide (proximité du Vorz) et très froide en hiver (cascades de glace). Ainsi, Il pourra parfois être difficile, notamment à certaines heures de la journée d'observer des gradients décroissants vers les points hauts du bassin et en particulier au niveau du refuge où se trouve la station suivante.

Station du Pleynet	
Altitude	1360 mètres
Exposition	Nord
Date d'installation	7 Octobre 2009
Pluviomètre	Capteur HOBO
Pas de temps	1 relevé/événement ($1Evt=0,199m$)
Sonde de température	Capteur HOBO
Pas de temps	1 relevé par heure

TAB. 3.2: Caractéristiques de la station météorologique du Pleynet

CHAPITRE 3. RÉSEAU DE MESURE À MULTI-ÉCHANTILLONNAGE :



FIG. 3.11: Station météorologique du Pleynet

3.2.2.2 Station du Refuge Jean-Collet (2060 mètres) :

Avec cette station (fig.3.12), on instrumente les altitudes médianes du bassin versant, et, dans un même temps, on avance progressivement à l'intérieur de celui-ci, vers les hauts sommets qui l'entourent. A partir de cette station qui surplombe directement le Pleynet, on pourra très probablement calculer des gradients orographiques précis en fonction de la saison, et mieux comprendre le déroulement des événements intenses sur le Vorz. L'équipement est quelque peu différent sur ce site (cf tab.3.3), puisque l'on n'utilise pas le même type de matériel, et, que l'on a ajouté pour le fonctionnement de la station un panneau solaire.

Les informations de températures de cette station seront à considérer en fonction de son exposition (à l'ouest), qui lui permet de conserver un ensoleillement important jusqu'en fin de journée. Ainsi, on constatera que c'est une des zones les plus chaudes du bassin versant, le reste étant relativement encaissé. Cette impression est confirmée par l'observation de la neige qui disparaît assez rapidement à cet endroit du bassin.

De plus, nous disposons ici d'un pyranomètre qui permet de mesurer la radiation solaire sur le versant. L'information pourra se révéler intéressante, notamment dans l'optique de la modélisation de la fusion nivale.

Station du Refuge Jean-Collet	
Altitude	2060 mètres
Exposition	Ouest
Date d'installation	6 Octobre 2009
Pluviomètre	Capteur Campbell
Pas de temps	1 relevé/15 minutes <i>Nombre d'évènements (1Evt=0,199m)</i>
Sonde de température	Capteur Campbell
Pas de temps	1 relevé par heure
Pyranomètre	Capteur Campbell
Pas de temps	1 relevé par heure

TAB. 3.3: Caractéristiques de la station météorologique du Refuge Jean-Collet

3.2. INSTRUMENTATION MÉTÉOROLOGIQUE :



FIG. 3.12: Station météorologique du Refuge Jean-Collet

3.2.2.3 Station du Lac Blanc (2230 mètres) :

La station du Lac Blanc (fig.3.4) est la plus haute station dont on dispose sur le Vorz. Ainsi, elle est une grande partie de l'année en milieu enneigé (entre novembre et mai approximativement), mais surtout, elle constitue un point d'information capital dans la quantification des épisodes pluvieux de haute altitude. Particulièrement encaissée dans le fond du bassin et séparé des autres stations par plusieurs ressauts ou vallons, il sera certainement difficile de calculer des gradients orographiques stables, mais cependant, nous disposerons de nombreuses données sur la variation des pluies sur le bassin durant un événement ou sur l'ensemble de la saison. Les caractéristiques techniques de cette station sont les mêmes que pour celle du Pleynet (cf tab.3.13).

Du point de vue de la température, nous relèverons ici les températures de la partie haute du versant, mais, il conviendra de prendre en compte le caractère encaissé de cette zone, ainsi que son orientation vers le nord qui en font un des sites les plus froids du bassin.

Station du Lac Blanc	
Altitude	2230 mètres
Exposition	nord-Ouest
Date d'installation	6 Octobre 2009
Pluviomètre	Capteur HOBO
Pas de temps	1 relevé/événement ($1Evt=0,199m$)
Sonde de température	Capteur HOBO
Pas de temps	1 relevé par heure

TAB. 3.4: Caractéristiques de la station météorologique du Lac Blanc

Ces trois stations météorologiques offrent un échantillonnage précis des différents paramètres météorologiques sur ce bassin versant (cf Figure 3.14). A partir de ces données, nous serons mieux à même de comprendre son fonctionnement général et d'établir des gradients thermiques et orographiques, afin d'interpoler les températures et précipitations à sa surface. Pour relever à ces deux challenges, l'installation de deux équipements supplémentaires, les totalisateurs et les iButtons, que nous allons présenter, a été réalisée.

CHAPITRE 3. RÉSEAU DE MESURE À MULTI-ÉCHANTILLONNAGE :



FIG. 3.13: Station météorologique du lac Blanc

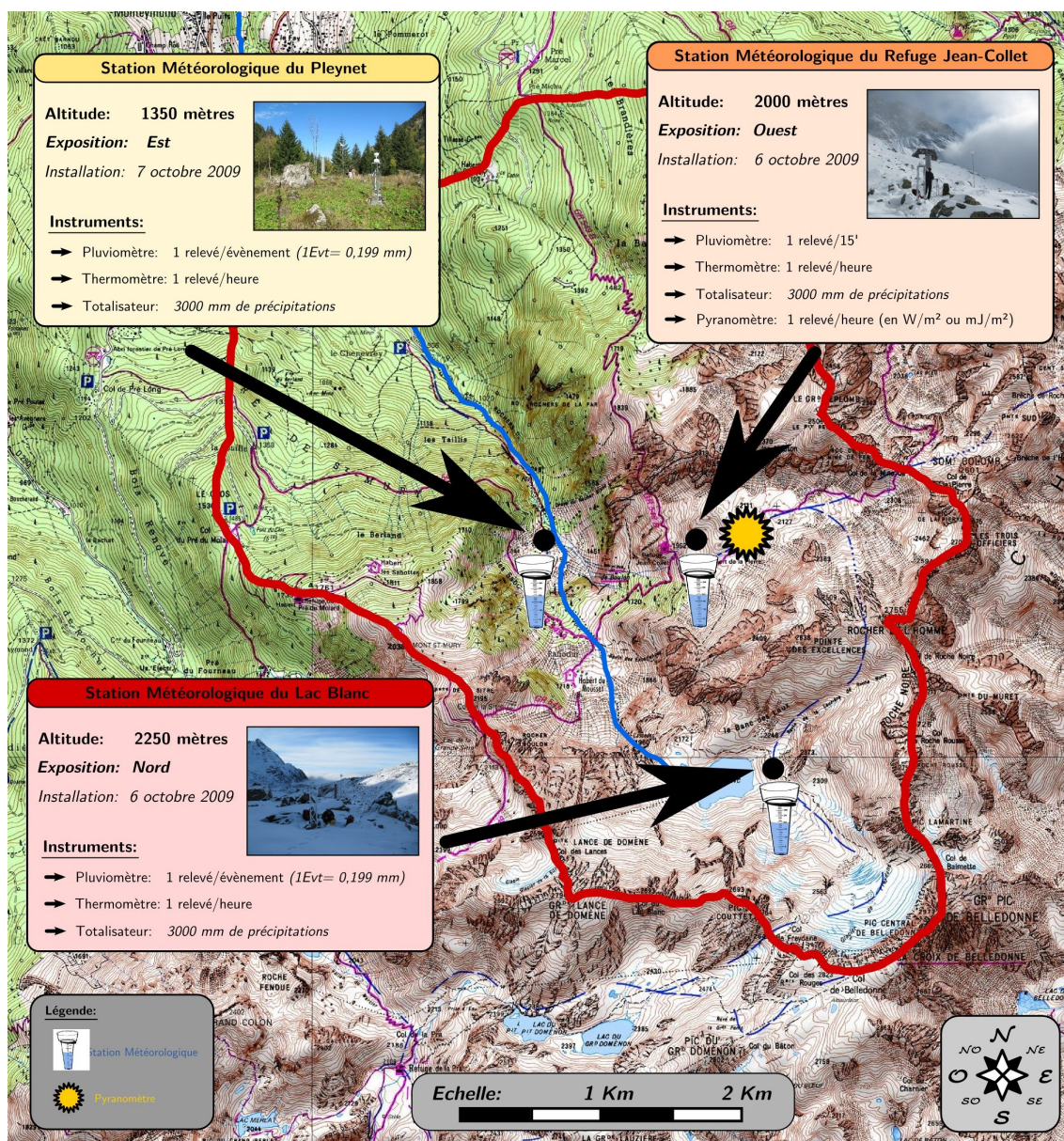


FIG. 3.14: Carte des stations météorologiques sur le Vorz

3.2. INSTRUMENTATION MÉTÉOROLOGIQUE :

3.2.3 Mesures pluviométriques sur le Vorz

La mesure pluviométrique sur le Vorz est réalisée en trois points distincts. Comme on l'a vu, les pluviomètres ne disposent pas de mécanisme de chauffage, notamment en raison du coût de tels appareils de mesure, mais également du fait de la consommation énergétique de tels dispositifs qui ne pourraient fonctionner efficacement sur le site. En conséquence, les stations météorologiques ne nous permettent pas de mesurer l'ensemble des précipitations sur le versant tout au long de l'année. Pour palier à ce problème, nous avons donc installé des totalisateurs à neige, au droit de chaque station météorologique, afin de connaître les cumuls pluviométriques sur des périodes données (dates des relevés manuels).

Le principe de ces totalisateurs est de collecter l'ensemble des précipitations au cours de l'année. Ils vont ainsi enregistrer les événements pluvieux et neigeux. Ils sont constitués d'un simple tube PVC de 50 centimètres de diamètre, soutenu par des aubans, et fermés à la base par un bouchon permettant la vidange du tube lorsque celui-ci est rempli. La hauteur du tube est de 3 mètres, et cela nous permet de pouvoir enregistrer près de deux saisons sans avoir à réaliser de vidange. Afin d'empêcher l'eau de geler, endommageant alors le tube, et d'éviter que l'eau collectée ne s'évapore, un liquide antigel et peu dense (fuel) a été placé à l'intérieur du tube.



FIG. 3.15: Totalisateurs en place sur le Vorz

Il existe un autre risque de perturber la mesure, celui de voir le sommet du tube se boucher en cas de grosse chutes de neige. Dans ces conditions, il semblait indispensable de mettre en place un dispositif permettant de limiter l'accumulation de neige sur les bords du tube. Pour cela, nous avons installé une éolienne à proximité de chacun des tubes. Cette éolienne est reliée à un fil chauffant placé sur le sommet du totalisateur, qui fait ainsi fondre les congères au fur et à mesure de leur formation. Ce dispositif a été observé durant une grosse chute de neige (près de 70 centimètres en quelques heures) et a montré un fonctionnement satisfaisant, comme en témoignent les photographies en figure 3.16).

Nous verrons dans les parties suivantes de quelles manières les données issues de ces totalisateurs seront utilisées dans l'interpolation de la pluviométrie sur le Vorz. On aura tout d'abord pris soin, de valider leur fonctionnement, en comparant les cumuls enregistrés par les pluviomètres durant la période estivale, à ceux collectés dans les totalisateurs placés à proximité des stations.

CHAPITRE 3. RÉSEAU DE MESURE À MULTI-ÉCHANTILLONNAGE :



FIG. 3.16: Principe de fonctionnement des totalisateurs

3.2.4 Le réseau de iButtons :

Comme nous l'avons déjà souligné, il manque pour bien contraindre les données d'entrée du modèle du bassin versant des informations essentielles sur l'hétérogénéité des températures. En effet, celle-ci est le facteur clé de l'hydrologie du bassin, puisqu'elle contrôle en particulier l'accumulation ou la fonte des stocks de neige en montagne. Ainsi, la quantification des variations de température à la surface de ce bassin, de taille limitée et morphologiquement très hétérogène, n'est pas possible uniquement à partir de nos trois stations météorologiques. En conséquence, la mise en place d'un réseau complémentaire s'avérerait nécessaire. Cependant, ce réseau de capteurs de température devait respecter une contrainte majeure : une autonomie énergétique suffisante (mesure, sauvegarde,...), notamment en hiver. Dans ce cadre, il devenait inenvisageable de mettre en place des stations de mesures classiques. Nous avons donc choisi d'utiliser des capteurs miniatures d'un type, qui bien que ne correspondant pas aux standards de la mesure thermique classique, permettent de mettre en évidence des variations de températures locales dues à des différences d'altitude, d'exposition ou de position dans le bassin.

Ces capteurs iButton sont de simples petits loggers de température, fonctionnant avec des piles classiques, et de très petite taille ($d=1,5\text{cm}$, $h=0,5\text{mm}$). De plus, ils présentent l'avantage d'être peu onéreux par rapport aux stations classiques, puisqu'ils ne coûtent que 20 euros l'unité. Le revers de ces caractéristiques est qu'il ne correspondent pas aux appareils de mesure standards, notamment en terme de conditions de prise de la mesure. En effet, contrairement aux stations classiques, ils ne sont pas isolés du milieu extérieur et en particulier du vent et du rayonnement direct du soleil. Ainsi, nous avons mis au point une capsule de protection permettant de limiter ces influences. Chaque iButton est donc placé dans une capsule de protection en plastique (cf première image de la figure 3.17) le protégeant de l'exposition directe du soleil, munie de petites encoches permettant la circulation de l'air autour de celui-ci, le laissant ainsi à la température ambiante.

3.2. INSTRUMENTATION MÉTÉOROLOGIQUE :

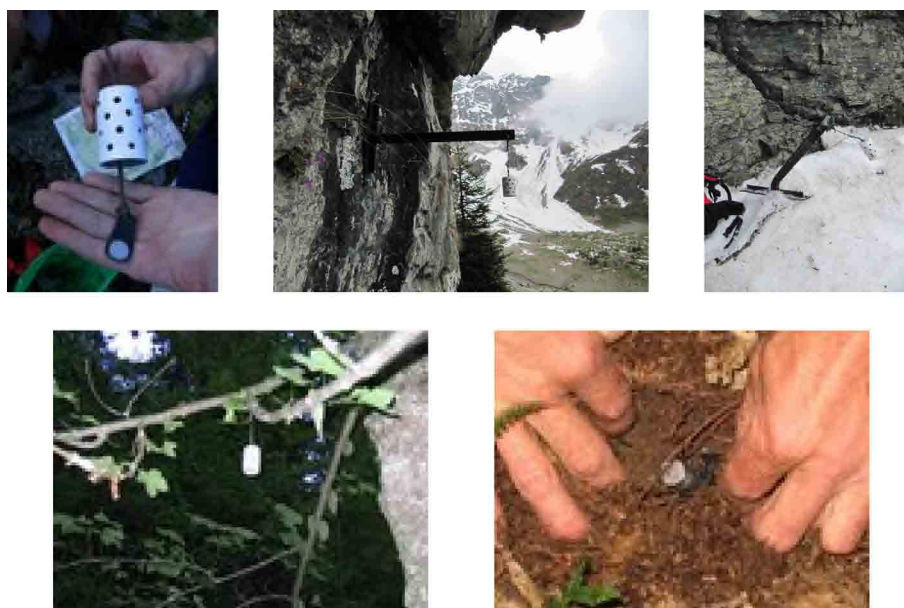


FIG. 3.17: Quelques exemple de iButton sur le terrain et des aléas des milieux de montagne

Les mesures effectuées avec ces capteurs sont de deux types : dans l'air et dans le sol. Nous avons disposé ces capteurs sur le versant, et, sur certains sites, la mesure a été complétée par une mesure de la température du sol, afin de nous renseigner sur les conditions thermiques à la base du manteau neigeux (fonte, gel,...). Il y a donc sur le bassin versant du Vorz :

- **23 Capteurs dans l'air** : Les capteurs munis de leur capsule sont accrochés à deux types de supports, soit des arbres, soit des rochers, par l'intermédiaires de fil de fer (image 4) ou de support métallique (image 2). L'impact de la position du iButton par rapport au support (circulation d'air, "chauffage" de la roche,...) sera étudié ultérieurement (cf. Chapitre 4).
- **15 Capteurs dans le sol** : Dans le sol, le iButton est placé directement dans le substrat, entre 5 et 10 centimètres sous la surface du sol. Afin de pouvoir être repérable facilement, il est muni d'un câble de repérage qui ressort à la surface. Nous n'avons pas rencontré de problèmes pour ces capteurs, bien que certaines détériorations aient été constatées au cours d'autres études pour des iButton soumis à de fortes sollicitation d'étanchéité, ce qui aurait pu être le cas dans le sol.

Le grand avantage de ces capteurs est qu'il permettent de prendre des mesures à un pas de temps très fin (quelques dixièmes). Dans notre cas, nous avons choisi de prendre une mesure par heure. La capacité de stockage du iButton dépendant du nombre de mesure et de la résolution, nous avons sélectionné des paramètres de mesure nous permettant d'obtenir une autonomie de près de 11 mois (8096 enregistrements), avec une résolution de $0,5^\circ$. La durée de vie de cet appareil dépend de celle de la pile. Jusqu'à présent, et après deux ans de mesures, nous n'avons pas constaté de pannes sur le réseau. L'ensemble des capteurs disponible sur le Vorz est présenté dans le tableau 3.5.

CHAPITRE 3. RÉSEAU DE MESURE À MULTI-ÉCHANTILLONNAGE :

Id	Nom du iButton	Altitude	Exposition	Air	sol
lb1	Pré marcel	1291 mètres	Nord-Ouest	x	x
lb2	La balme	1450 mètres	Ouest	x	x
lb3	La Gorge	906 mètres	Nord	x	-
lb4	Pré-Long	1398 mètres	Est	x	x
lb5	Cabane Pleynet	1360 mètres	Nord	x	-
lb6	Arbre-à-coude	1400 mètres	Est	x	x
lb7	Sentier Refuge	1850 mètres	Ouest	x	x
lb8	Le Mollard	-	-	-	-
lb9	Pierrier Pleynet	1450 mètres	Est	x	x
lb10	Station Pleynet	1360 mètres	Nord	x	-
lb11	Feuillu pierrier	1450 mètres	Nord-Est	x	-
lb12	Refuge Jean Collet	1950 mètres	Ouest	x	-
lb13	Sapin pierrier	1580 mètres	Nord-Est	x	x
lb14	Station Refuge	2060 mètres	Ouest	x	x
lb15	Falaise Mousset	1750 mètres	Ouest	x	x
lb16	Sapin Habert	1680 mètres	Nord	x	x
lb17	Falaise Ouest	1800 mètres	Est	x	x
lb18	Falaise Haute	1900 mètres	Nord	x	x
lb19	Appareil Lac	2350 mètres	Ouest	x	-
lb20	Rocher du Diable	2200 mètres	Nord-Est	x	x
lb21	Station Lac	2230 mètres	Nord-Ouest	x	x
lb22	Glacier	2450 mètres	Nord-Ouest	x	x
lb23	Sentier sup.	2190 mètres	Ouest	x	-

TAB. 3.5: Liste des capteurs ibutton présents sur le Vorz

Ces capteurs peuvent présenter des incertitudes de mesure de la température comparé aux outils classiques. En conséquence, il a été jugé nécessaire de corriger ces erreurs avant leur utilisation. Pour cela, nous avons mis en place deux techniques différentes. La première technique consistera à utiliser le iButton placé au droit des stations classiques, afin de déterminer l'écart à la température réelle, et de pour pouvoir à partir de celui-ci recalculer l'ensemble du réseau. Une seconde solution est de n'utiliser que les informations de variations de la température. De fait, on ne regarde plus la température absolue mesurée, mais plutôt les écarts entre les stations qui eux sont dus à des variations de position, d'altitude ou d'exposition, et correspondent à des phénomènes physiques réels que l'on souhaite quantifier. C'est cette seconde voie qui a été privilégiée, et le réseau sera ici utilisé en "mode relatif". Cette technique sera discutée dans la troisième partie de ce mémoire.

L'objectif principal est de quantifier les variations de températures selon les caractéristiques d'altitude et d'exposition du bassin. Nous avons mis en place le réseau de manière à rendre compte le mieux possible de ces variations. L'ensemble des expositions a ainsi été instrumenté, pour des altitudes comprises entre 900 et 2450 mètres. Le facteur limitant de ces opérations reste malgré tout l'accessibilité aux capteurs, qui compte tenu de la topographie et du relief escarpé du bassin ne nous permet pas d'accéder à toutes les zones de celui-ci lors d'une même campagne de relevé. De plus, il faut également prendre en considération le temps de collecte des données, puisque celle-ci doit être effectuée manuellement à des pas de temps réguliers (au moins deux fois par an : printemps, automne), afin de s'assurer du bon fonctionnement du réseau. La carte ci-après (fig.3.18) présente le réseau iButton mis en place sur le bassin versant du Vorz depuis le mois de Septembre 2009.

3.2. INSTRUMENTATION MÉTÉOROLOGIQUE :

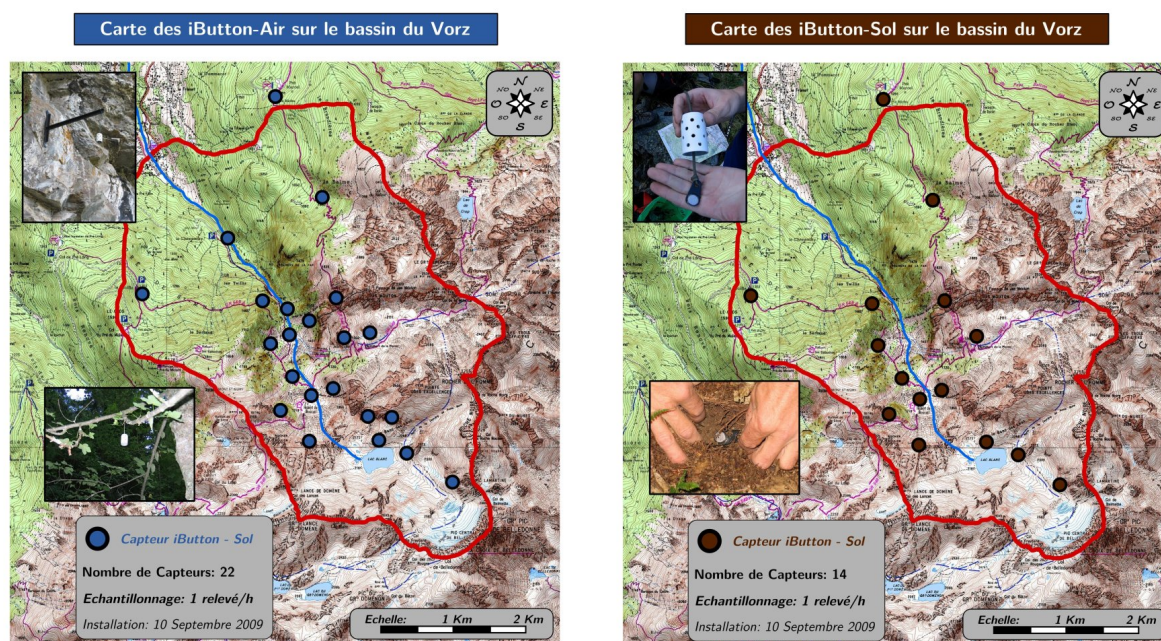


FIG. 3.18: Carte du réseau des iButton-Air et iButton-Sol sur le Vorz

Le maillage spatial de ce réseau est son atout majeur. En effet, comparé aux stations classiques à partir desquelles on ne peut qu'interpoler les températures sur de grandes surfaces, avec des tendances et évolutions relativement lissées, nous serons ici capables de réaliser cette interpolation en prenant en compte des variations locales à des échelles assez fines, de l'ordre de la centaine à la dizaine de mètres. La prise en compte de l'altitude et de l'exposition à des échelles relativement fines, lors de la modélisation nivologique est notre objectif, ainsi que la modélisation de phénomènes locaux comme les circulations thermiques, ou les inversions de températures. La mise en évidence de ces effets peut se faire de différentes manières. Nous avons positionné certains iButton de façon à simplifier ce travail au maximum. Il existe ainsi à la surface du bassin versant plusieurs transects et profils (cf fig.3.19) qui permettent de pré-découper l'espace au moment de l'installation du réseau.

CHAPITRE 3. RÉSEAU DE MESURE À MULTI-ÉCHANTILLONNAGE :

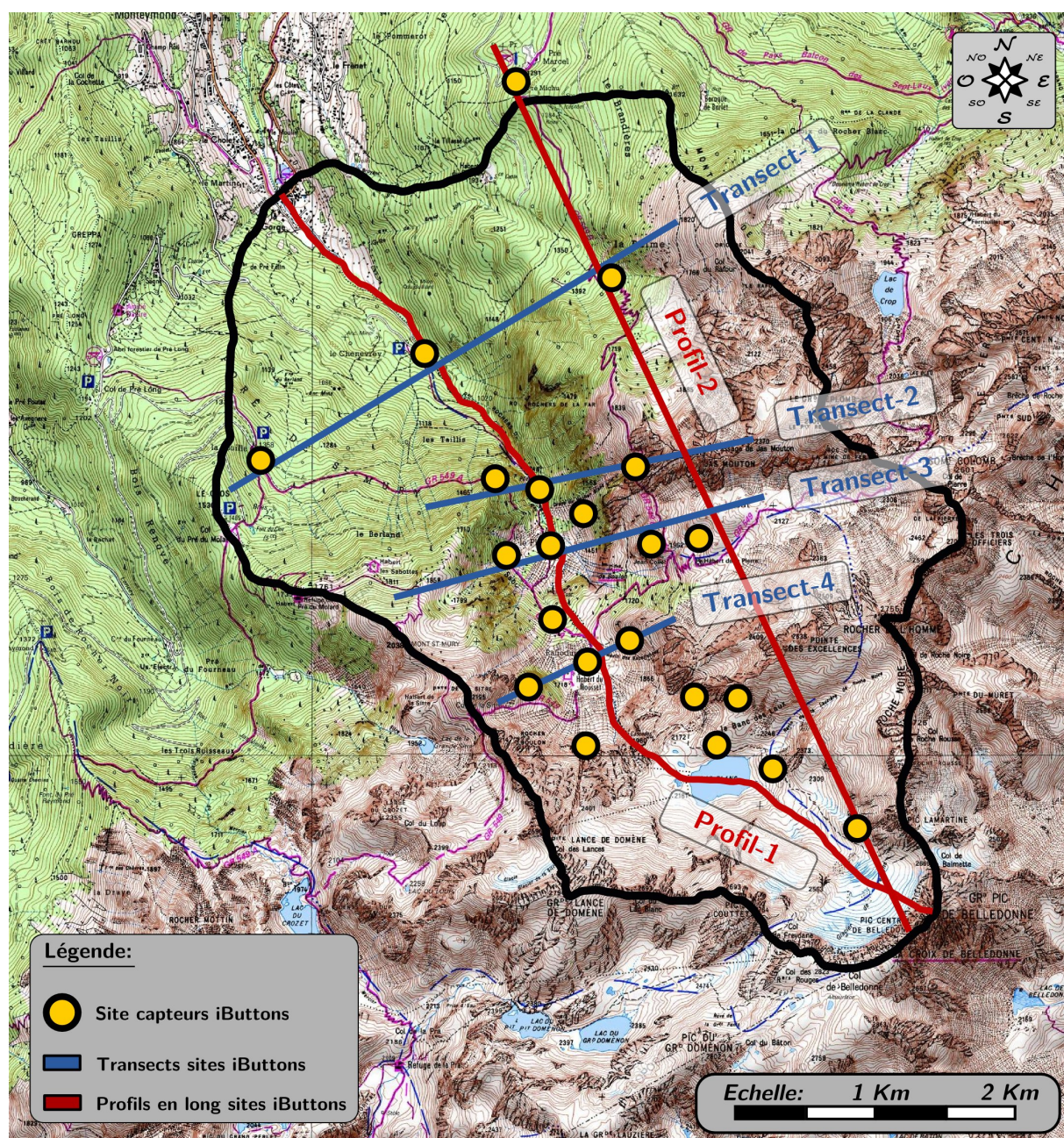


FIG. 3.19: Carte des transects et profils de répartition des iButton-Air et iButton-Sol sur le Vorz

On distinguera dans ce réseau deux types de dispositions :

- **Les transects : Analyse des effets de l'exposition et des phénomènes physiques locaux** : Au nombre de 4, ils découpent le bassin versant de façon transversale et permettent de mettre en évidence des circulations d'air, ou des modifications du champ de températures en fonction de l'enfoncement vers l'intérieur du bassin, sur l'ensemble de la colonne d'air (répartition altitudinale). Ils regroupent des iButtons placés sur un alignement perpendiculaire à l'écoulement du Vorz et présentant des expositions différentes, voir opposées. Il devrait donc être possible à partir de ces transects d'étudier

3.2. INSTRUMENTATION MÉTÉOROLOGIQUE :

l'évolution des températures au cours de la journée, en fonction de la course du soleil et de l'exposition.

- **Les profils : Analyse des effets de l'altitude et des gradients thermiques :** Les deux profils en place permettent d'observer l'évolution des températures en fonction de l'altitude. Ils regroupent des iButtons placés selon la même exposition mais à des altitudes différentes. A partir de ces profils, on sera capable de déterminer un gradient altitudinal des températures en fonction de l'exposition.

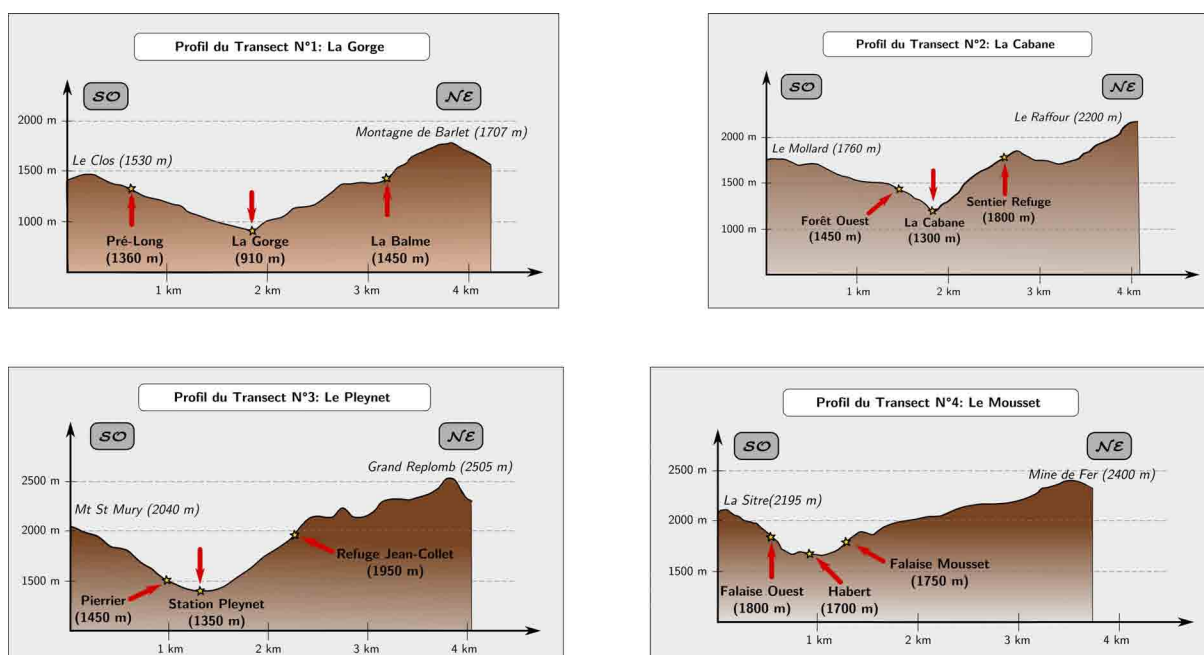


FIG. 3.20: Variations altitudinales le long des transects

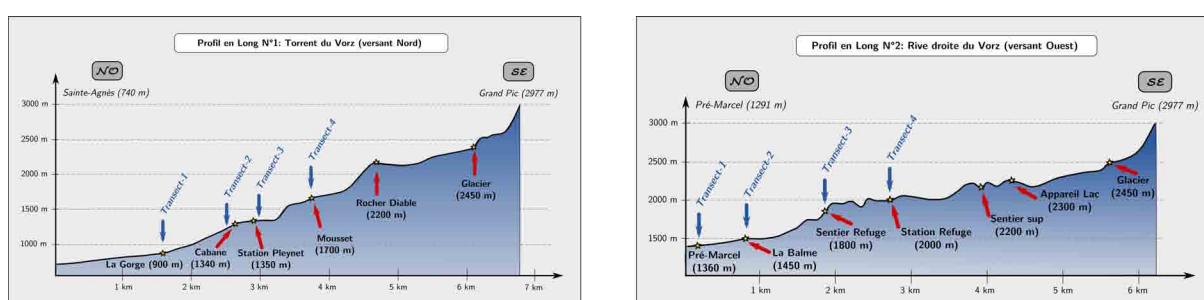


FIG. 3.21: Variations altitudinales le long des profils

Les iButtons constituent un support intéressant de mesure des températures à haute résolution spatiale et temporelle. Ce support nous permet de mettre en évidence des phénomènes physiques sur le champ de température, à des résolutions relativement fines, et sur des pas de temps courts. En cela, nous serons aidés par leur disposition le long de profils et transects sur une large gamme d'altitudes (900 à 2450 mètres). Au final, nous devrions être capables, en travaillant de manière relative avec ces mesures, et en les recalant sur celles des stations météorologiques,

CHAPITRE 3. RÉSEAU DE MESURE À MULTI-ÉCHANTILLONNAGE :

de modéliser par interpolation l'évolution du champ des températures à la surface du bassin versant au pas de temps horaire.

Mesures Hydrométriques :

3.3.1 Le capteur IMAGINE :

Le capteur IMAGINE (*HyMAGE-TIP à l'origine*) a été créé en 2005, lors des travaux de recherche doctorale de Guillaume Fourquet. Le principe général de ce capteur est de mesurer les débits hydrologiques de manière non-intrusive par analyse d'image. L'intérêt de ce capteur est qu'il permet de mesurer le débit en continu, depuis la berge, étant ainsi protégé en cas de crues. De plus, cette technique relativement peu onéreuse et donne des résultats dont les incertitudes sont comparables à celles des appareils de mesure classique.

La mesure hydrométrique se décompose en trois phases distinctes (cf fig.3.22) :

- Détection automatique de la hauteur d'eau sur les images
- Transformation de la scène 2D en scène 3D pour avoir accès aux données spatiales réelles
- Détection de la vitesse sur un couple d'image

Les 3 phases précédentes permettent de calculer le débit. En effet, la première phase réalise la détection de la hauteur d'eau de la rivière. Dans les faits, on utilise un élément fixe dans la scène, sur lequel on a déterminé des points géoréférencés, afin de réaliser les calculs géométriques en 3 dimensions nécessaires. Cette phase de détection automatique utilise l'analyse colorimétrique de l'image, et permet de détecter l'intersection entre notre point fixe (mire, pile de pont,...) et la rivière.

Une fois ce travail effectué, on utilise le relevé topographique réalisé en début de travail, pour créer les transformations géométriques 3D, permettant l'expression des distances dans le monde réel. On est ainsi capable de disposer de la hauteur de la rivière non plus en pixels mais en mètres.

Enfin pour calculer le débit, on analyse deux images différentes, prises à des pas de temps proches. De cette manière, on détecte le champ de déplacement dans l'image (flotteurs, remous,...), et par simple différence temporelle en connaissant les distances dans l'image, on calcule la vitesse de déplacement.

Au final, on utilise les hauteurs et les vitesses mesurées par le capteur pour calculer le débit.

Le capteur IMAGINE fait actuellement l'objet d'une valorisation et industrialisation dans le cadre d'un partenariat Université de Savoie / CNRS / Gravit / Grain. La création d'une start-up va permettre sa commercialisation, et l'utilisation du capteur par le grand public. Dans notre cas, nous avons installé en novembre 2008, une version du capteur sur le torrent du Vorz. Nous disposons ainsi d'images en continu du Vorz depuis cette date, avec un pas de temps de mesure de 5 minutes.

L'ensemble du dispositif doit faire l'objet en début de processus d'une phase de relevé topométrique. En effet, le positionnement de l'image de manière correcte dans le monde réel (en 3D) se fait à partir de correspondance entre les points relevés sur les terrains et leurs homologues dans les images (en 2D). Ainsi, un relevé au théodolite est effectué afin de disposer de coordonnées précises, et de pouvoir calculer les transformations géométriques nécessaires. De plus, un relevé du profil topométrique du lit de la rivière est effectué, permettant ainsi de réaliser un calcul de débit précis, avec les données mesurées par le capteur.

CHAPITRE 3. RÉSEAU DE MESURE À MULTI-ÉCHANTILLONNAGE :



FIG. 3.22: mesure du débit par le capteur IMAGE

3.3.2 Le capteur IMAGE sur le Vorz :

Sur le Vorz, nous réalisons une acquisition d'image toutes les 5 minutes, ce qui devrait être suffisant pour accéder à des informations sur la variation des régimes hydrologiques pendant une journée de fonte ou encore lors d'une crue. De plus, ce dispositif nous permet de voir de quelle manière se comporte l'onde de crue, ou de fonte, en "temps réel différé". Le problème principal se posant pour ce capteur est la nécessité de disposer d'une alimentation électrique, afin de faire fonctionner les éléments le composant, à savoir l'ordinateur nécessaire à l'acquisition des images, la caméra et le projecteur infra-rouge permettant la mesure nocturne du débit. Cette alimentation électrique est possible sur le Vorz à la hauteur de la prise d'eau du Pleyne, qui collecte de l'eau pour la turbiner à la centrale située environ 200 mètres en contrebas. A cette occasion, les phases de turbinages sont susceptibles, de venir perturber les champs électromagnétiques locaux, et ont entraîné occasionnellement des problèmes d'acquisition. Depuis le mois de Décembre 2010, un nouvel ordinateur équipé d'un programme de gestion de fonctionnement du système complet, et d'un "blindage électromagnétique" a permis de s'affranchir de ce problème, puisque l'on ne constate plus de pertes ponctuelles d'images.

Dans notre cas, nous sommes situés à la prise d'eau du Pleyne, dont les caractéristiques principales sont résumées dans la figure 3.23. L'installation du capteur a eu lieu en Novembre 2008, et, nous disposons à l'heure actuelle de près de 3 ans de données en continu. Les images de la figure 3.24 montrent quelques exemples d'acquisitions sur le torrent du Vorz, en hiver, été, période de fonte et de nuit.

3.3. MESURES HYDROMÉTRIQUES :



FIG. 3.23: Capteur IMAGINE sur le Vorz

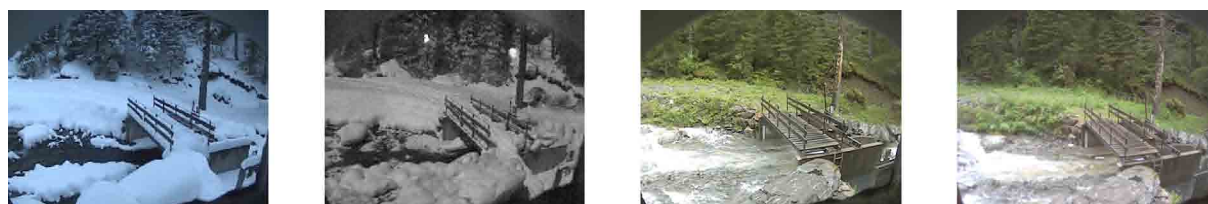


FIG. 3.24: Exemples d'images acquises sur le Vorz : 1-December 2009 ; 2-Nuit Janvier 2010 ; 3-Fonte Juin 2010 ; 4-Ete 2011

Section 3.4

Mesures Nivologiques :

3.4.1 Nécessité de la création d'un capteur nivologique original :

L'objectif est ici de disposer d'un capteur au coût modéré et possédant des résolutions temporelles (journalier) et spatiales (dizaine de mètres) satisfaisantes pour les modèles nivologiques.

3.4.1.1 Limites de l'utilisation des techniques d'imageries nivologiques classiques :

La création du capteur automatique de la couverture neigeuse a débuté à l'automne 2008. A cette période, les réflexions liées à l'instrumentation du bassin versant du Vorz étaient en cours. Le problème de la quantification et de la caractérisation de la neige s'est posé. Traditionnellement, l'utilisation de perches à neige, télénivomètres ou de relevés de terrain est privilégiée pour effectuer l'observation du manteau neigeux. Cependant, dans le cadre du "Projet Vorz", l'objectif de la haute résolution spatiale et temporelle des données a mis en évidence un manque évident en termes d'instrumentation de terrain. Ainsi, plusieurs options de techniques d'observations étaient envisageables :

- Mesures de terrain (relevés manuels, perches à neige,...)
- Utilisation des images aériennes ou satellitaires
- Développement d'un système de mesure *in-situ*

La mise en place de campagnes de mesures régulières sur le manteau neigeux est compliquée sur tout bassin versant de montagne. En raison de l'étagement altitudinal et de la diversité spatiale (orientation, topographie locale,...), la quantité de zones à échantillonner est considérable. De telles campagnes auraient constitué sur notre bassin versant un élément chronophage important durant la réalisation du projet, tout en n'apportant que des observations très limitées en terme de représentativité spatiale et temporelle. De plus, l'évolution dans un milieu de haute montagne contraint considérablement les périodes de manipulations possibles sur le bassin en toute sécurité (mauvais temps, avalanches,...).

La première solution alternative envisagée reposait sur les techniques de télédétection classiques, telles que l'imagerie aérienne ou satellitaire. Bien que remplissant pleinement les conditions nécessaires en terme de résolution spatiale (quelques mètres), ces techniques présentent l'inconvénient majeur de ne pouvoir être utilisées que pour des pas de temps importants. En effet, si les images satellitaires à haute résolution sont renouvelées avec une périodicité d'environ 15 jours pour Landsat par exemple (capacité double avec la présence de 2 satellites), les images aériennes issues des campagnes aériennes sont rarement produites plus d'une fois par an (souvent plusieurs années).

Au vue des contraintes et limites imposées par ces différentes solutions, le développement d'une technique *in-situ* permanente, ne nécessitant pas d'intervention régulière de personnel ou de système d'imagerie mobile, a été initié.

3.4. MESURES NIVOLOGIQUES :

3.4.1.2 Vers la mise en place d'un capteur *in-situ* :

Compte tenu des éléments précédents et des objectifs de mesures, à savoir la caractérisation du manteau neigeux sur l'ensemble de ses altitudes, orientations,... il semblait de plus en plus évident qu'une seule technique était en mesure de répondre à nos attentes : **la photographie**.

Grâce aux innovations techniques des dix dernières années, et notamment l'avènement des appareils photographiques numériques, il est possible aujourd'hui d'atteindre des résolutions très satisfaisantes avec des modèles grand public et bon marché. De plus, l'évolution des capacités mémoires des cartes et appareils, permet de réaliser plusieurs milliers de clichés sans aucun souci de stockage. Cet outil permet donc d'acquérir un grand nombre de données spatiales (vue depuis l'appareil), le tout avec une fréquence d'acquisition élevée, et une bonne résolution temporelle. L'ensemble de ces caractéristiques laissait à penser qu'il était possible d'utiliser de tels appareils fonctionnant en permanence sur le bassin versant, et dont les données pouvaient être exploitées pour suivre l'évolution du manteau neigeux.

Les appareils numériques ont un défaut : une consommation énergétique relativement élevée. Du fait de sa situation géographique, il était peu envisageable de relier ces appareils à une alimentation électrique quelle qu'elle soit. L'utilisation d'une alimentation alternative était donc indispensable. La source la plus évidente et pratique d'énergie (quantité, fiabilité, robustesse,...) dans de telles zones est sans aucun doute l'énergie solaire. Une alimentation d'appoint par des batteries des appareils a également été décidée, afin de le rendre parfaitement autonome durant toute la durée d'un hiver, période pendant laquelle l'accès au bassin versant est problématique.

De fait, cette technique innovante devait à ce stade se substituer aux opérateurs de terrains, tout d'abord de part sa capacité d'échantillonnage temporelle, mais également en raison des résolutions de mesures spatiales. Le fait de laisser ainsi un capteur à demeure sur le bassin nous permettait également d'étudier des phénomènes autres que l'évolution nivologique, en "direct différé", comme par exemple le type de temps, les précipitations,... Ainsi, la conception de ce capteur *in-situ* a débuté durant l'hiver 2009 et son installation est effective sur le bassin depuis octobre 2009.

3.4.2 Mise en place et principe du capteur nivologique :

Nous ne présenterons pas ici les détails du fonctionnement du capteur SnoDEC (Système Nivologique Opérationnel de Détection de l'Enneigement en Continu) que nous avons mis au point au cours de cette thèse. Cela sera l'objet de la seconde partie de ce manuscrit. Cependant, avant même de disposer de la chaîne de traitement informatique, nous avons mis en place des appareils photographiques numériques sur le versant. Ces appareils, au nombre de deux, permettent d'observer en continu l'évolution de l'enneigement sur la partie haute et médiane du bassin versant du Vorz. Le tableau des caractéristiques de ces appareils est présenté ci-dessous (tableau 3.6).

Les images collectées à partir de ces appareils vont nous permettre pour chacune d'elle de dresser automatiquement la cartographie des zones enneigées sur le versant. Nous serons ainsi en situation de pouvoir contraindre le modèle nivologique à partir de ces données précises et continues sur l'enneigement du Vorz. Bien entendu, ces données posséderont un fort taux d'échantillonnage spatial (environ 10 mètres) et temporel (5 à 7 images par jour). Quelques

CHAPITRE 3. RÉSEAU DE MESURE À MULTI-ÉCHANTILLONNAGE :

	Altitude	Resolution	Pas de temps	Installation
Refuge Jean Collet	1950 m	10 Mpix	5 Images/Jour (ΔT : 3h)	Octobre 2009
Lac Blanc	2250 m	10 MPix	7 Images/Jour (ΔT : 2h)	Octobre 2009

TAB. 3.6: Appareils photographiques sur le Vorz

exemples des images obtenues qui seront traitées par la suite sont présentés dans la figure 3.25.

3.4. MESURES NIVOLOGIQUES :

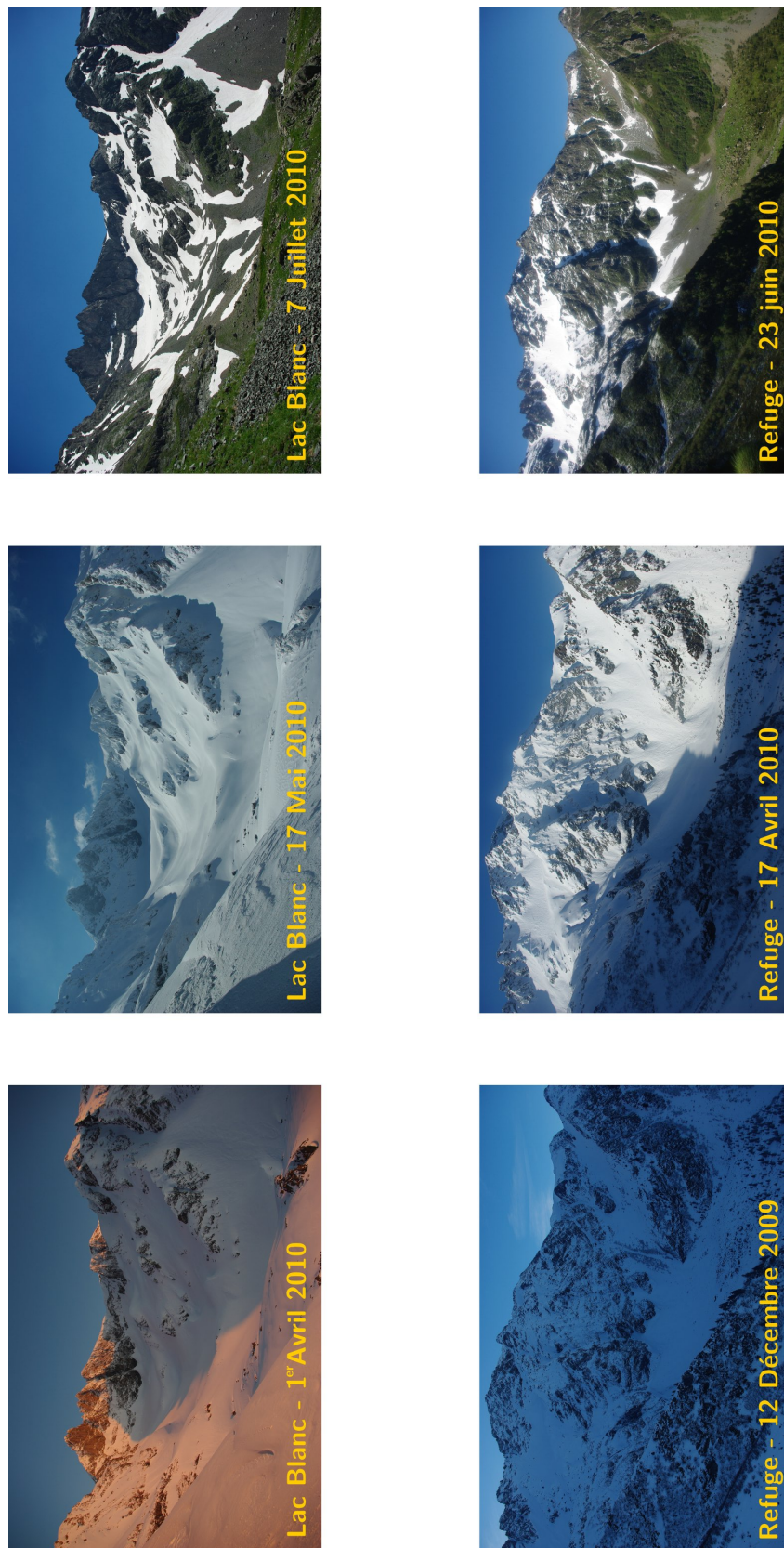


FIG. 3.25: Exemples d'images acquises sur les deux sites du Vorz

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 3 :

Ce chapitre nous a permis de présenter le réseau d'instrumentation présent sur le bassin versant du Vorz. Le principe de ce réseau est de réaliser un multi-échantillonnage ponctuel partiel à haute résolution spatiale et temporelle. Ainsi, nous espérons que la quantité et la diversité des informations enregistrées nous permettra de compenser les incertitudes liées aux mesures des différents capteurs. De plus, l'ensemble de ces données ponctuelles sera utilisé pour construire des cartographies des différents phénomènes météorologiques se produisant sur le versant (champs de températures, pluviométrie, nivologie,...), à de très fines résolutions. Pour cela, nous avons mis en place un réseau hydrométéorologique entièrement opérationnel depuis Octobre 2009. Celui-ci est composé comme suit :

- *Hydrométrie :*
Capteur Imagine (1 mesure toutes les 5 minutes)
- *Météorologie :*
 - *Températures :*
 - (*) *3 stations de températures classiques*
 - (*) *40 iButtons, donc 23 dans l'air et 15 dans le sol*
 - *Précipitations :*
 - (*) *3 pluviomètres non chauffant (1 mesure toutes les 10 minutes)*
 - (*) *3 totalisateurs (relevés saisonniers)*
- *Nivologie :*
2 appareils photographiques équipés du système SnoDECC (cf partie 2)

Maintenant que nous avons présentés les caractéristiques techniques, et physiques de ce réseau, nous allons dans le chapitre suivant présenter les premiers résultats obtenus à partir de deux saisons de données.

3.4. MESURES NIVOLOGIQUES :

Chapitre 4:

Observation hydro-météorologique sur le Vorz, analyse de deux années de fonctionnement :

Sommaire du Chapitre:

4.1 Mesure du régime hydrologique : <i>La caméra IMAGINE</i> :.....	113
4.1.1 Un premier bilan du fonctionnement :.....	113
4.1.2 Analyse des évènements de crues et de forts débits :	114
4.2 Climatologie sur le bassin versant du Vorz : <i>Les stations météorologiques</i> :.....	117
4.2.1 Mesure de la pluviométrie par les totalisateurs :.....	117
4.2.2 Stations météorologiques sur le Vorz :.....	119
4.2.3 Caractéristiques météorologiques locales :.....	123
4.3 Mesure du champ de températures : <i>Les iButtons</i> :.....	125
4.3.1 Mesure des températures locales :.....	125
4.3.2 Fiabilité et précision des mesures :	126
4.3.3 Températures du sol :	131
4.3.4 Températures dans l'air :	132

Introduction du Chapitre 4 :

Le réseau hydrométéorologique du Vorz est en construction depuis Novembre 2008, et opérationnel depuis Octobre 2009. Ainsi, nous disposons aujourd'hui de près de deux saisons de données. Dans ce chapitre, l'objectif est de présenter les premiers résultats de la mise en place du réseau, et de rechercher les premières tendances climatiques se dégageant des données.

Le facteur principal de réussite d'une instrumentation est la fiabilité du réseau de mesure. Cependant, en zone de montagne, l'hostilité du milieu rend ce paramètre très aléatoire, et fortement dépendant des différents aménagements qui sont souvent réalisés avec des matériaux basiques. Ce chapitre sera l'occasion de faire le bilan des échecs et réussites, des tentatives d'adaptabilités des appareils traditionnels aux milieux montagnards. De plus, nous quantifierons précisément les taux de fonctionnement du réseau en place.

Pour cela, nous allons comme dans le chapitre 3, distinguer les différents domaines dans lesquels l'instrumentation a été menée. Tout d'abord, nous verrons quelle a été la qualité du fonctionnement du capteur Imagine, et, nous montrerons quelques exemples d'épisodes hydrologiques remarquables enregistrés entre 2008 et 2011. Ensuite, nous analyserons le comportement des stations météorologiques (pluies et températures), et, nous essaierons de caractériser les tendances climatiques générales que l'on peut observer sur le bassin versant du Vorz. Enfin, après avoir quantifier les taux de réussite des capteurs iButtons, nous verrons qu'à partir des quelques données de bases, il est possible de se faire une première idée du comportement du champ de température à la surface du bassin versant.

CHAPITRE 4. OBSERVATION HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE SUR LE VORZ, ANALYSE DE DEUX ANNÉES DE FONCTIONNEMENT :

Section 4.1

Mesure du régime hydrologique : *La caméra IMAGINE* :

La caméra IMAGINE a rappelons le, les deux objectifs suivants :

- Filmer le torrent du Vorz en continu pour y observer les épisodes de crues
- Quantifier les régimes hydrologiques par détection des hauteurs

Depuis Novembre 2008, la caméra est installée à la hauteur de la prise d'eau du Pleyne net a permis de répondre à nos objectifs, en raison de la disponibilité d'une alimentation électrique et d'un local de maintenance permettant de protéger les équipements du milieu extérieur). Nous avons du faire face à différentes difficultés (froid, réseaux de productions électriques proches,...), qui sont venues perturber l'enregistrement des images, sans toutefois provoquer de pertes massives d'informations. Durant cette période de 3 ans, il est donc peu probable que nous ayons manqué un épisode de crue.

4.1.1 Un premier bilan du fonctionnement :

4.1.1.1 Capacité d'enregistrement des images :

A partir de notre base de donnée, un premier bilan peu être tiré, quantifiant statistiquement les pertes potentielles dans la chronique. La figure 4.1 montre l'évolution des phases de fonctionnement de la caméra sur le terrain. Au total, ce sont plus de 225 000 images qui ont été enregistrées durant ces trois années, avec seulement deux interruptions ponctuelles du logiciel d'acquisition, conduisant à deux périodes de manque pendant l'hiver 2009/2010 et l'été 2010.

Afin de s'assurer que nous n'avions pas manqué d'épisodes importants des observations

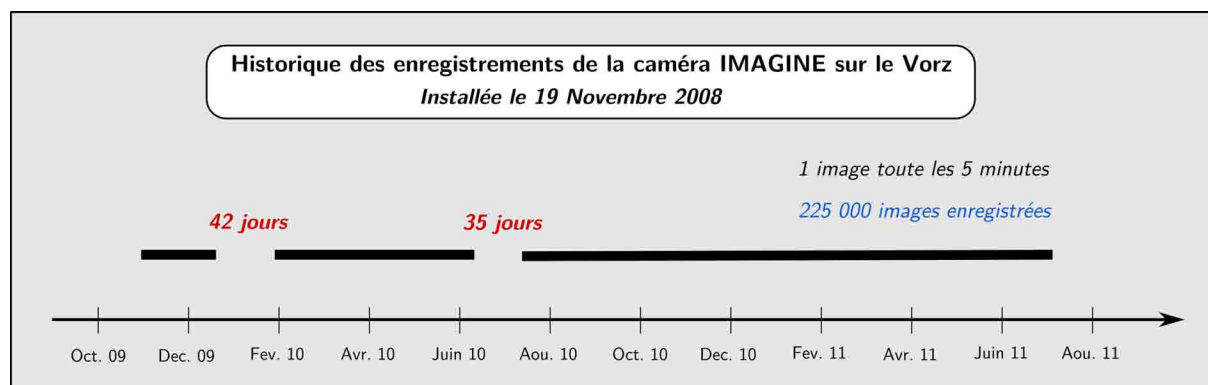


FIG. 4.1: Historique d'acquisition des données de la caméra entre Octobre 2011 et Juin 2011

de terrain (trace de crues, suivi du lit,...) ont été menées et nous ont confirmé que tous les épisodes s'étant produits durant ces 3 dernières années ont été enregistrés.

4.1.1.2 Difficultés de fonctionnement sur le terrain :

Lors de la phase d'exploitation de la caméra, plusieurs biais de fonctionnement, notamment dans l'acquisition des images ont été relevés. A plusieurs reprises, même si le logiciel d'acqui-

4.1. MESURE DU RÉGIME HYDROLOGIQUE : LA CAMÉRA IMAGINE :

sition réalisait correctement les opérations d'imagerie, un certain nombre d'images n'étaient pas convenablement enregistrées dans la carte mémoire de l'ordinateur. Une source possible de problème est la proximité d'une prise d'eau dans laquelle un turbinage était effectué, ainsi que la proximité d'un réseau électrique conséquent. Afin de remédier à ce problème, des câbles blindés ont été disposés dans l'installation, améliorant sensiblement les résultats de l'acquisition.

Dans un second temps, le capteur a été équipé d'un dispositif de mesure nocturne, par l'intermédiaire d'une nouvelle caméra (haute définition) possédant un mode infra-rouge, et munie d'un projecteur, permettant ainsi les observations nocturnes. Depuis novembre 2011, nous disposons donc d'un outil disponible et opérationnel 24 heures sur 24, développé au sein du laboratoire EDYTEM par *Bruno Galabertier*. A cette occasion, le logiciel d'acquisition a été complètement repensé (interface java) et permet une meilleure sauvegarde (carte SD et disque interne) et un meilleur archivage (arborescence journalière) des données. Dans le même temps, ces changements conséquents sur le capteur ont permis de résoudre totalement les problèmes ponctuels d'acquisition des images.

4.1.2 Analyse des évènements de crues et de forts débits :

4.1.2.1 Un exemple d'onde de crue estivale :

A l'origine, la caméra IMAGINE était installée sur le versant pour quantifier les écoulements en période "normale", mais également pour observer le cas échéant les phénomènes de crues torrentielles susceptibles de se produire sur le Vorz. Cependant, durant les 3 premières années de fonctionnement, nous n'avons jamais observé de phénomènes torrentiels majeurs. Néanmoins, le 26 Août 2009, une onde de crue due à un orage local, a pu être mise en évidence en fin de journée (cf. figure 4.2). Il est malheureusement impossible d'étudier plus en détail cet évènement, puisque les installations météorologiques n'étaient pas encore en place sur le versant. Malgré tout, en se basant sur les relevés de la station de Chamrousse, ou aucune précipitation n'a été enregistrée, on peut penser que l'origine de cet épisode orageux est très localisée.



FIG. 4.2: Quelques images de l'onde de crue

Cette crue est remarquable par sa rapidité. En effet, on observe les premières traces de pluie à 19h58 sur la surface du mur de la prise d'eau. A 20h13, une première élévation du niveau du torrent est observée. Celui-ci atteint un pic de près de $1m^3$ entre 20h20 et 20h35, puis la décrue se produit de manière rapide jusque vers 21h30 (cf. figure 4.3). A ce moment là, le débit est proche de celui d'avant la crue. L'évènement est donc d'une durée très courte (à peine 1h30), et d'intensité modérée, bien que le débit ait doublé en quelques minutes. Ces

CHAPITRE 4. OBSERVATION HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE SUR LE VORZ, ANALYSE DE DEUX ANNÉES DE FONCTIONNEMENT :

observations conduisent à penser que lors d'événements très intenses, le bassin versant réagit rapidement, et, en cas de forte crue laisse peu de place à l'anticipation pour l'évacuation de la population du village de La Gorge. Dans ce cadre, la mise en place d'un système de télétransmission à la hauteur de la prise d'eau pourrait jouer un rôle essentiel dans la mise en place d'une alarme pour les populations alentour.

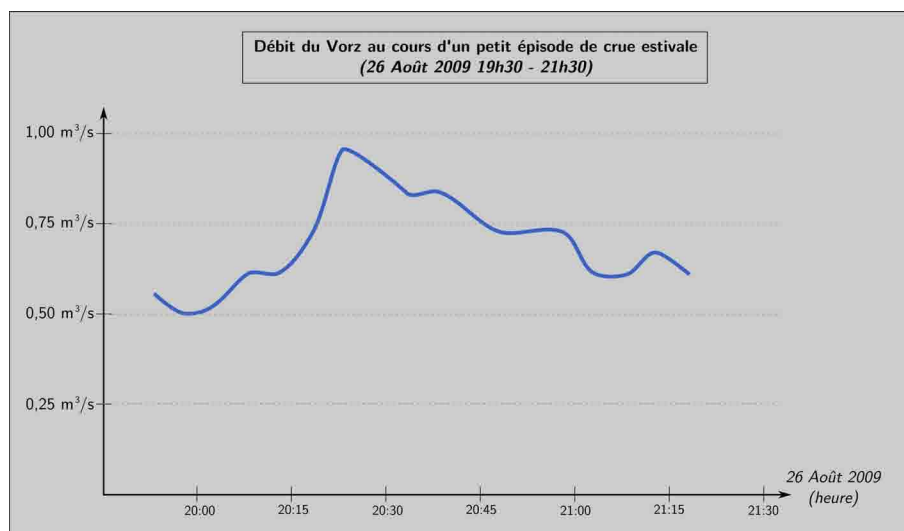


FIG. 4.3: Une petite onde de crues estivale observée en 2009

4.1.2.2 Forts débits de fonte et épisodes pluvieux :

Ces épisodes sont de nature très différente. En effet, lorsque l'on regarde les pluies mesurées sur le bassin, celles-ci sont relativement limitées puisque l'on ne mesure que 30 mm au refuge et au pleyet les 16 et 18 Juin, avec une intensité très modérée. Ainsi, l'augmentation du régime hydrologique est due d'une part à ces précipitations, mais d'autre part, au phénomène de fonte de neige. La partie haute étant encore quelque peu enneigée, cette neige fond durant les heures les plus chaudes de la journée, on observe d'ailleurs un pic de fonte le 17 Juin dans l'après-midi (cf. figures 4.5 et 4.4). Cette fonte est complétée par les pluies, et, probablement les petits aquifères (moraines, cônes, ...) des zones médianes du bassin, qui relâchent progressivement l'eau stockée lors de la fonte. Au final, on est en présence d'un événement, atteignant son pic lors de la nuit du 18 au 19 (précipitations enregistrées), engendré par des conditions typiques de la fonte printannière, c'est-à-dire des sols saturés en eau, une fonte importante et une période pluvieuse (mais non exceptionnelle).



FIG. 4.4: Quelques images des forts débits

4.1. MESURE DU RÉGIME HYDROLOGIQUE : LA CAMÉRA IMAGINE :

Cet évènement interroge sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant. En effet, compte tenu des faibles pluies relevées, et de la quantité modérée de neige pouvant potentiellement fondre, on est en droit de se demander pourquoi cet épisode est comparable en terme de débits à des épisodes estivaux intenses. Une hypothèse envisageable pour expliquer ces forts débits, malgré les faibles quantités d'eau disponibles, est que l'eau qui ne peut être stockée par les petits aquifères locaux (pierrier du Mousset,...), en situation de saturation (forte humidité du bassin), ne s'infiltre pas, et se retrouve intégralement dans les écoulements de surface. Cette hypothèse sera étudiée plus en détails dans les parties finales de ce manuscrit, puisqu'elle jouera un rôle essentiel dans la compréhension des processus hydrologiques du bassin versant, et les futures modélisations hydrologiques.

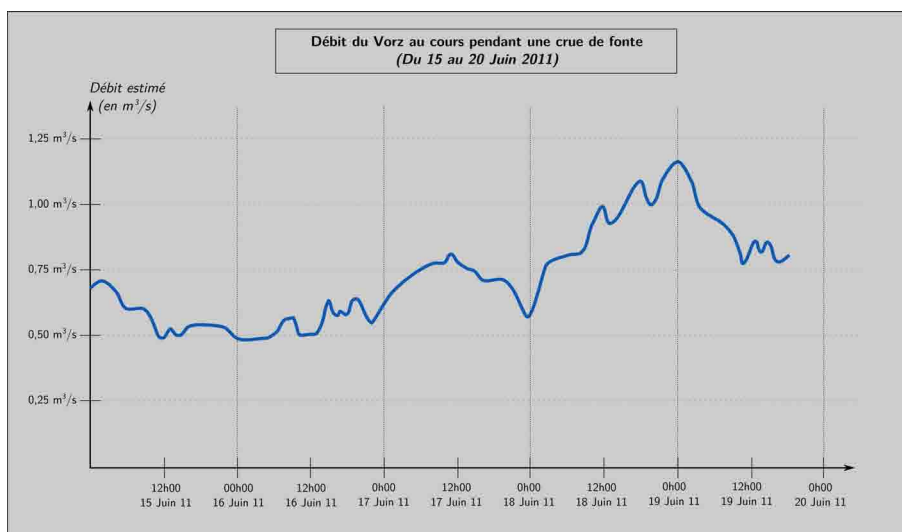


FIG. 4.5: Exemple d'une crue de fonte sur le Vorz

CHAPITRE 4. OBSERVATION HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE SUR LE VORZ, ANALYSE DE DEUX ANNÉES DE FONCTIONNEMENT :

Section 4.2

Climatologie sur le bassin versant du Vorz : *Les stations météorologiques :*

4.2.1 Mesure de la pluviométrie par les totalisateurs :

4.2.1.1 Taux de remplissage et évolution temporelle :

Les totalisateurs ont globalement répondu aux attentes en terme de récupération des pluies. Ainsi, le rôle de l'éolienne et du fil chauffant a été validé lors d'une forte chute de neige durant laquelle des observations ont montré que le tube ne s'obstruait pas (70 cm de neige fraîche). Malgré un vieillissement accéléré du fait de l'exposition à un milieu contraignant (froid, soleil,...) ils ont résisté durant près de deux ans. Cependant, le totalisateur du refuge a cédé durant l'hiver 2010-2011, probablement en raison de son remplissage par l'eau et de la faible présence de neige empêchant l'isolation à la base du tube et permettant à l'eau de geler. Ainsi, la dernière partie de la chronique ne sera pas complète.

Totalisateur du Pleyhet		
<i>Date</i>	<i>Cumul (en cm)</i>	<i>pluie (en mm)</i>
7 Oct. 2009	0 cm	0 mm
27 Mai 2010	140 cm	1400 mm
22 Oct. 2010	215 cm	750 mm
22 Jun. 2011	339 cm	1240 mm

TAB. 4.1: Mesures du totalisateur du Pleyhet

Totalisateur du Refuge		
<i>Date</i>	<i>Cumul (en cm)</i>	<i>pluie (en mm)</i>
7 Oct. 2009	0 cm	0 mm
27 Mai 2010	134 cm	1340 mm
6 Juil. 2010	158 cm	240 mm
19 Oct. 2010	218 cm	600 mm
22 Jun. 2011	***	***

TAB. 4.2: Mesures du totalisateur du Refuge

4.2. CLIMATOLOGIE SUR LE BASSIN VERSANT DU VORZ : LES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES :

Totalisateur du Lac Blanc		
Date	Cumul (en cm)	pluie (en mm)
7 Oct. 2009	0 cm	0 mm
27 Mai 2010	114 cm	1140 mm
6 Juil. 2010	142 cm	280 mm
19 Oct. 2010	196 cm	540 mm
22 Jun. 2011	302 cm	1060 mm

TAB. 4.3: Mesures du totalisateur du Lac Blanc

A partir de des tableaux 4.1, 4.2 et 11.3, il est possible en se basant sur les relevés communs aux 3 totalisateurs (mai 2010, octobre 2010) de calculer la vitesse de remplissage sur chaque site et d'en déduire la hauteur attendue sur une année entière. Les résultats de ce calcul sont données dans le tableau suivant (tab.4.4) et viennent confirmer le graphique (4.6) :

Précipitations annuelles aux totalisateurs			
	Pleynet	Refuge	Lac Blanc
pluie annuelle	2150 mm	2180 mm	1960 mm

TAB. 4.4: Estimation des précipitations annuelles d'après les totalisateurs

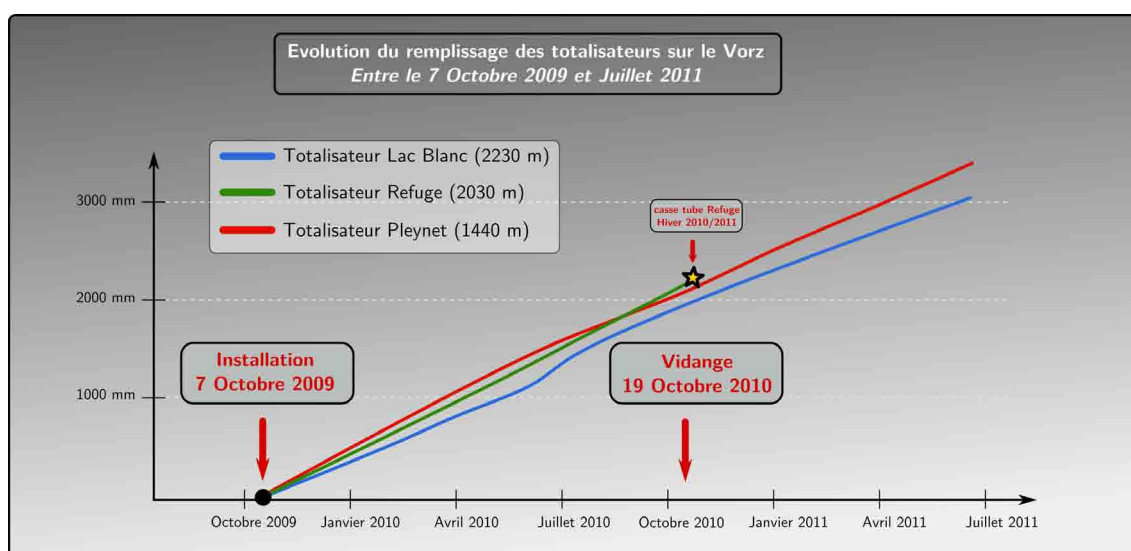


FIG. 4.6: Courbes de remplissage des totalisateurs sur le Vorz

4.2.1.2 Un régime pluviométrique particulier :

Les données précédentes permettent de mettre en évidence un comportement pluviométrique assez difficile à anticiper du bassin versant. En effet, on constate essentiellement durant les mois d'hiver un gradient orographique négatif entre les différents totalisateurs, avec un maximum enregistré au Pleynet. Malgré tout, ce gradient semble s'inverser durant les mois d'été. Cependant, de manière générale, les stations du Pleynet et refuge enregistrent globalement plus de précipitations que le Lac Blanc.

CHAPITRE 4. OBSERVATION HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE SUR LE VORZ, ANALYSE DE DEUX ANNÉES DE FONCTIONNEMENT :

Parmi les périodes communes aux trois totalisateurs dont on dispose, on peut calculer un gradient significatif uniquement entre le Pleynet et le Lac Blanc. Celui-ci est décroissant en fonction de l'altitude et peut être estimé à environ 30 mm/100m/an, soit près de 240 mm de différence entre les deux stations au niveau annuel. En revanche, malgré la différence d'altitude notable entre le Refuge et le Pleynet, on ne met en évidence quasiment aucune différence.

L'interprétation de ces chiffres est complexe, mais il semble malgré tout se dessiner une tendance qui sera à confirmer lors de l'analyse des données pluviométriques horaires des épisodes estivaux. Ainsi, on peut penser que la disparité des précipitations locales est plus liée à la morphologie des versants qu'à leur altitude. En effet, les stations du Pleynet et refuge sont situées en entrée de bassin et enregistrent sensiblement les mêmes cumuls, tandis que le Lac Blanc, placé dans le fond du bassin, plus à l'écart de l'influence de la vallée du Grésivaudan, apparaît plus protégé et enregistre des cumuls plus faibles. Cette analyse semble cohérente avec les données enregistrées, mais, elle doit être confirmée par l'étude des précipitations aux faibles pas de temps.

Un élément susceptible de corroborer cette hypothèse d'une prédétermination des précipitations en fonction de la morphologie, et non pas de l'altitude, est de comparer avec la station "voisine" de Chamrousse. Ainsi, à Chamrousse, on relève sur cette même période des totaux beaucoup plus faibles que ceux enregistrés au Pleynet, malgré une altitude plus importante de près de 400 mètres. Il conviendra donc lors de nos interpolations des pluies sur le bassin de prendre en compte cette tendance générale à l'échelle saisonnière de l'évolution des précipitations en fonction de la position dans le bassin.

4.2.2 Stations météorologiques sur le Vorz :

Les totalisateurs nous ont apporté des informations générales sur la pluviométrie. Ces informations vont maintenant être complétées par les stations météorologiques, qui donneront de plus une dimension thermique à l'ensemble des mesures.

4.2.2.1 Climatologie locale :

Le bassin de vorz est situé en moyenne et haute montagne, on s'attend donc à retrouver des températures spécifiques à ces milieux. Ainsi, les températures moyennes annuelles sont relativement proche de 0 pour la partie haute du versant (Lac Blanc), et reste assez faible pour le Refuge et le Pleynet avec respectivement 2,2°C et 3,4°C. Ces valeurs sont à considérer dans un contexte d'altitude élevée, mais également dans une configuration assez encaissée du bassin. De fait, les stations du lac Blanc et du Pleynet sont une grande partie de l'année, et surtout de l'hiver, située dans des zones qui sont à l'ombre des versants et ne bénéficient pas du soleil.

Les températures minimales et maximales sont dans le même ordre de grandeur, elles frôlent en effet les -20°C durant les mois d'hiver et ne s'élèvent que peu au dessus des 25°C en été. L'amplitude thermique est donc importante, même dans la partie supérieure du bassin, et permet la fonte de l'essentiel du manteau neigeux, ainsi que l'ablation du glacier pendant l'été.

La répartition des températures recouvre donc une certaine logique, avec une décroissance selon l'altitude, et ce, malgré les différences d'orientation des stations météorologiques. On peut donc penser que d'une part, celles-ci ne sont pas suffisamment différentes pour créer des écarts de signification, mais également d'autre part que les capteurs sont relativement bien isolés et standardisés pour la mesure de la température.

Les pluviomètres n'étant pas chauffants, nous n'avons pu travailler en détail sur les pré-

4.2. CLIMATOLOGIE SUR LE BASSIN VERSANT DU VORZ : LES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES :

cipitations journalières et horaires en hiver. Cependant, en été, il a été possible de discerner les événements majeurs. Ainsi, les précipitations les plus intenses (à distinguer des plus importantes pouvant être atteintes en hiver) se produisent durant les mois de juin, juillet et août. Les enregistrements maxima donnent des cumuls importants, mais pas exceptionnels sur la période de mesure. La pluie horaire maximale enregistrée est de 27,5 mm au Pleynet le 4 Juillet 2010, avec des totaux plus faibles pour les stations plus en altitude (probabilité de chutes de neige). Pour le Refuge et le Lac Blanc, le maximum horaire enregistré est d'environ 15 mm, le 13 Juin 2010, et il a été observé le passage d'une onde de crue sur le Vorz à l'occasion de ces événements (environ $1m^3/s$).

Bien qu'il soit difficile de cerner une tendance de l'analyse des données de précipitations journalières, on peut sembler discerner plusieurs types de comportements lors des événements principaux. Ainsi, lorsque l'épisode pluvieux est généralisé, il semble que les gradients orographiques soient globalement décroissants avec l'altitude ce qui est contraire aux situations habituelles mais représentatif de ces deux années de mesure. En revanche, lors d'un épisode local, on observe des comportements distincts entre la partie haute (Refuge, lac Blanc) et la partie basse (Pleynet), mais, même si ces groupements de stations semblent réagir de manière cohérente, on ne retrouve pas de gradient systématique. En conséquence, l'hypothèse posée précédemment semble se confirmer, à savoir que les précipitations sont essentiellement gouvernées par la morphologie du bassin et la typologie de l'événement (orage estival, perturbation active,...), que par la différence d'altitude à elle seule sur le bassin.

Extrêmes climatiques			
	<i>Pleynet</i>	<i>Refuge</i>	<i>Lac Blanc</i>
Altitude	1440 m	2030 m	2230 m
Température maximale	29,75°C	22,3°C	24,16°C
Température moyenne	3,42°C	2,23°C	0,73°C
Température minimale	-19,22°C	-18,78°C	-19,96°C
Pluie horaire Maximum	27,46 mm (04/07/10 - 14h)	15,72 mm (13/06/10 - 17h)	17,71 mm (13/06/10 - 17h)

TAB. 4.5: Quelques grandeurs remarquables sur les stations météorologiques du Vorz

Le tableau suivant (tab. 4.6) met en évidence quelques grandeurs significatives pour le bassin versant. Le nombre de jours de pluie annuel est statistiquement élevé (de 60 à 80%), mais reste à pondérer par le fait que les pluviomètres ne sont pas chauffant. Ce chiffre donne en revanche une idée du nombre de jours pour lesquels l'eau est disponible pour alimenter les écoulements, soit par la fonte d'un épisode récent, soit par la présence de conditions pluvieuses. Les capacités hydrologiques, essentiellement liées à la fonte des neiges sur le bassin, sont donc influencées par un facteur pluviométrique conséquent durant une grande partie de l'année. En effet, ce qui est enregistré dans les pluviomètres, et ce même en hiver, reflète le comportement du bassin pour un pas de temps de quelques heures, voir une journée, il existe donc de fortes capacités d'écoulement uniquement liées aux précipitations sur le Vorz. Cette caractéristique sera à prendre en compte lorsque l'on étudiera les phénomènes de crues et en particulier les crues liées aux épisodes de fonte associés à des périodes pluvieuses chaudes, telles que l'on en trouve en mai, juin ou juillet.

En ce qui concerne les nombres de jours de gels et fortes chaleurs, essentiellement liés aux températures, ils correspondent relativement bien à ce que l'on a établi d'après le tableau

CHAPITRE 4. OBSERVATION HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE SUR LE VORZ, ANALYSE DE DEUX ANNÉES DE FONCTIONNEMENT :

précédent. Ainsi, le nombre de jours de gel est maximum au Lac Blanc avec près de 80% de l'année ou la température est négative (à un moment de la journée), et seulement 3% de jours de fortes chaleurs. Ces nombres évoluent de manière respectivement décroissante et croissant vers le Pleynet, ou l'on conserve tout de même des conditions de froid pendant des durées relativement longues, avec près de 60% de l'année ou on peut trouver des conditions de gel.

Caractéristiques climatiques			
	<i>Pleynet</i>	<i>Refuge</i>	<i>Lac Blanc</i>
Altitude	1440 m	2030 m	2230 m
Nombre de jours de Gel	204 (56%)	243 (66%)	289 (79%)
Nombre de jours de Forte chaleur ($T > 15^{\circ}C$)	34 (9%)	13 (4%)	12 (3%)
Nombre de jours de pluie	288 (79%)	257 (70%)	221 (60%)

TAB. 4.6: Caractéristiques climatiques du bassin versant du Vorz

4.2.2.2 Analyse du fonctionnement des stations météorologiques :

Après avoir analysé au premier abord les données des stations, il convient de déterminer dans quelle mesure nous sommes en droit de les utiliser, et quelles sont les marges d'erreurs probables sur ces données. Pour ce faire, nous allons tout d'abord nous intéresser aux différences de mesures entre totalisateurs et pluviomètres durant la période estivale ou l'influence de la neige n'est pas préjudiciable. Ensuite, nous essaierons de quantifier le taux de fonctionnement des pluviomètres tout au long de l'année.

a) Différence de mesure entre totalisateur et pluviomètre :

Le meilleur moyen de valider le fonctionnement des totalisateurs est de comparer leur mesure par rapport à celle des pluviomètres. Afin de s'affranchir de la problématique de la neige, nous avons étudié cette relation durant la période estivale, où ces problèmes sont réduits. Dans ce cadre, les cumuls des totalisateurs pour des périodes pour lesquelles nous disposons de relevés sont comparés avec les cumuls enregistrés par le pluviomètre. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau 4.7.

L'analyse des résultats montre que les différences moyennes entre les deux mesures sont

Comparaison des mesures pluviométriques									
Date	Lac Blanc			Refuge			Pleynet		
	Tot.	Pluvio.	Diff.	Tot.	Pluvio.	Diff.	Tot.	Pluvio.	Diff.
27/05/10									
06/07/10	28mm	33,1mm	-18,2%	24mm	34,1mm	-42,1%	-	-	-
19/10/10	54mm	45mm	16,6%	60mm	45,8mm	23,6%	75mm	65,1mm	13,2%
Total		-0,8%			-9,3%			13,2%	

TAB. 4.7: Comparaisons des mesures effectuées par les totalisateurs et les pluviomètres

assez faibles (moins de 10%). Sur cette période, la non présence d'épisodes neigeux importants a été vérifiée, et les différences ne peuvent donc s'expliquer par la présence de neige. Un facteur possible de différence est la surface de collecte différente entre les deux appareils. Ainsi, le totalisateur a un diamètre de 500 mm, sensiblement plus importante que celui du pluviomètre. Dans le même ordre d'idée, la hauteur de collecte diffère de près de 1,5 mètres entre les deux capteurs. Ces deux configurations de mesure peuvent expliquer une partie de

4.2. CLIMATOLOGIE SUR LE BASSIN VERSANT DU VORZ : LES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES :

ces différences.

Une autre explication peut être la possible évaporation à l'intérieur du totalisateur. En effet, celui-ci est équipé d'une couche limite (fuel) permettant d'empêcher le gel dans le tube et de protéger l'eau de cette évaporation. Malgré tout, il est possible et même probable que quelques millimètres d'eau puisse tout de même s'évaporer lors de journées particulièrement ensoleillées pendant lesquelles le soleil fait chauffer les parois du tube.

En conséquence, il semble que l'on puisse utiliser les totalisateurs comme étalon des précipitations hivernales, puisque leurs mesures sont relativement cohérentes. Cependant lors des périodes estivales, on aura intérêt à utiliser les pluviomètres, et conserver les totalisateurs pour valider en continu leur bon fonctionnement (fuite, évaporation importante,...) au cours du temps.

b) Taux de fonctionnement des pluviomètres :

Les pluviomètres n'étant pas chauffant, ils ne peuvent fonctionner en hiver, du fait de l'accumulation de la neige dans le receptacle. Cette neige, finit la plupart du temps par se sublimer ou s'évaporer, et donc, n'est pas mesurée par le pluviomètre, au contraire du totalisateur qui mesure ce phénomène. Ainsi en comparant les valeurs enregistrées, on devrait être capable de quantifier la proportion d'eau non mesurée par les pluviomètres. Cependant, cette estimation ne sera pas extrêmement précise, puisque la neige du collecteur peut parfois fondre et passer dans le pluviomètre quelques heures après la chute, ainsi, la mesure sera "optimiste" et les taux de fonctionnement réels seront logiquement plus faible. Le tableau 4.8 permet de com-

Caractéristiques pluviométriques			
	<i>Pleynet</i>	<i>Refuge</i>	<i>Lac Blanc</i>
Mesure Totalisateur	339 mm	218 mm	302 mm
Mesure Pluviomètre	269 mm	156 mm	178 mm
Différence	79,25%	70,70%	59,0%

TAB. 4.8: Caractéristiques pluviométriques du bassin versant du Vorz

parer les cumuls enregistrées par les totalisateurs et par les pluviomètres pour les différentes stations durant leurs deux années de fonctionnement. Les totalisateurs enregistrant la totalité des précipitations, la différence avec les mesures pluviométriques représente la part de la neige qui fond dans le pluviomètre sans passer par les augets, et donc la fraction non-enregistrée des événements pluvieux. On remarque que la différence est maximale pour le Lac Blanc avec près de 40% de précipitations non mesurées par le pluviomètre. Cette différence décroît avec l'altitude pour atteindre seulement 20% de déficit à la hauteur du Pleynet. Ainsi, la présence de neige dans les pluviomètres entraîne une non-mesure des précipitations pendant 20% à 40% du temps sur le bassin. A ces pourcentages, il conviendra de rajouter la fraction de neige qui fond à retardement dans le collecteur du pluviomètre, et est enregistrée à des heures erronées puisque décalées de la chute effective. Ainsi, au moment de l'utilisation des données pluviométriques, une comparaison avec la température ambiante sera nécessaire afin d'éliminer dans la mesure du possible les épisodes neigeux et la fonte qui s'en suit, qui vient perturber les mesures.

En conséquence, le taux de fonctionnement effectif de notre réseau doit tendre vers les 50% pour la partie haute et 75% pour la partie basse. En conséquence, les données du Lac Blanc par exemple, ne seront probablement pertinentes qu'entre les mois de juin et septembre, à condition de s'affranchir des épisodes neigeux par élimination en fonction des températures.

CHAPITRE 4. OBSERVATION HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE SUR LE VORZ, ANALYSE DE DEUX ANNÉES DE FONCTIONNEMENT :

4.2.3 Caractéristiques météorologiques locales :

La météorologie locale peut être aisément quantifiée à partir des diagrammes climatiques des différentes stations (cf figure 4.7). Malgré quelques différences, sensibles, le comportement semble globalement cohérent entre les stations et ne révèle pas de problèmes majeurs de mesure.

En ce qui concerne les températures, l'évolution annuelle est sensiblement la même pour les 3 stations, à la seule différence des valeurs de températures décroissantes au fur et à mesure de l'élévation en altitude. Ces courbes mettent en évidence un hiver très froid de décembre à mars et un été court (juin, juillet, août), avec un pic de température en juillet et août. Le reste, constitue la transition entre les deux saisons, et est marqué par une forte variabilité des conditions dans ces zones où le temps est variable très rapidement. L'information principale que l'on peut tirer de ces courbes est que la forme de l'évolution des températures est la même selon les stations (Pleynet et Lac Blanc orienté au nord et Refuge orienté à l'ouest). En conséquence, il semble que l'effet de l'exposition n'intervienne pas de manière prépondérante dans la mesure, ce qui doit être le cas pour une quantification normale du climat. Il en ressort donc que les capteurs sont correctement isolés et peuvent être considérés comme standard.

L'étude des précipitations met clairement en évidence des problèmes d'acquisitions pour la période hivernale dus à la non-utilisation de pluviomètres chauffants. Il sera de fait délicat d'obtenir des informations à partir de ces seuls pluviomètres en hiver, mais au vu des totalisateurs il semble que durant cette période le gradient orographique n'est pas aisément indentifiable et est plus lié à la morphologie, comme vu précédemment. Cependant, en été, et particulièrement en août, les précipitations sont maximales au Lac Blanc, ce qui met en évidence une prédominance des épisodes pluvieux courts et intenses sur la partie haute du bassin versant ; et ce, au détriment d'épisodes de plus longue durée comme on peut en trouver en juin, septembre et octobre, et qui eux affectent l'ensemble du bassin versant. Ainsi, la période la plus délicate du point de vue des crues est clairement le mois d'août, avec des cumuls importants sur la partie haute du bassin versant.

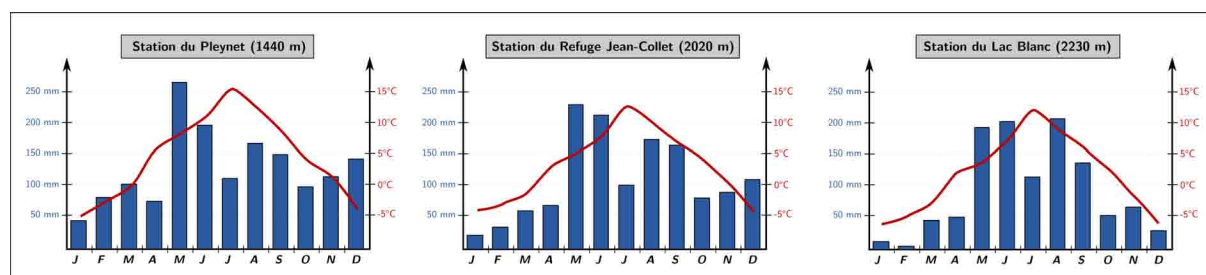


FIG. 4.7: Diagrammes climatiques des stations du Vorz

Bien que ce travail fasse l'objet d'une partie spécifique par la suite, en intégrant les données plus complètes des iButtons, il est possible à partir des 3 stations météorologiques d'établir un premier gradient général sur le versant. La précision de celui-ci sera limitée, puisqu'il repose sur trois stations orientées selon différentes expositions et équipées de différents types de capteurs. De fait le gradient le plus précis sera celui calculé à partir des stations du Pleynet et Lac Blanc puisqu'elles sont toutes les deux orientées au nord et équipées du même type de capteur. Le

4.2. CLIMATOLOGIE SUR LE BASSIN VERSANT DU VORZ : LES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES :

tableau 4.9 présente les différents gradients calculés entre les 3 stations.

Gradients de température	
Stations	Degré/100m
Lac Blanc - Pleynet	0,35 °C/100m
Lac Blanc - Refuge	0,70 °C/100m
Refuge - Pleynet	0,20 °C/100m
Gradient moyen	0,4 °C/100m

TAB. 4.9: Gradients de température sur le Vorz

Le gradient calculé est relativement proche des $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, ce qui montre l'existence d'une réelle influence de l'altitude pour les températures, contrairement à ce que l'on a observé pour les précipitations (impact morphologique prépondérant). Ainsi, ce gradient permet d'obtenir un ordre de grandeur pour le gradient thermique du versant qui est ici assez faible. Au regard de cette constatation, nous allons maintenant voir quelles sont les différences que l'on peut observer avec les capteurs de températures de type iButton.

CHAPITRE 4. OBSERVATION HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE SUR LE VORZ, ANALYSE DE DEUX ANNÉES DE FONCTIONNEMENT :

Section 4.3

Mesure du champ de températures : *Les iButtons* :

La connaissance du champ de température est essentielle, en particulier lors de la phase de modélisation de la fonte des neiges. Ce champ étant dépendant de plusieurs facteurs, comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, un réseau de capteurs miniatures de température a été mis en place sur le Vorz afin d'échantillonner au mieux les altitudes et expositions. Les paragraphes à venir présentent les premiers résultats de ces mesures.

4.3.1 Mesure des températures locales :

L'essentiel des mesures que nous allons utiliser en continu pour la modélisation sont celles issues des iButtons situés dans l'air. Indépendamment de cela, les iButtons situés dans le sol seront utilisés pour mieux contraindre les périodes de début d'accumulation, et de fin de fonte du manteau neigeux. En place depuis octobre 2009, ces iButtons nous ont permis de constituer deux années de chroniques quasiment ininterrompues pour la majorité des sites. La figure 4.8 présente quelques grandeurs climatiques classiques calculées sur le réseau du Vorz.

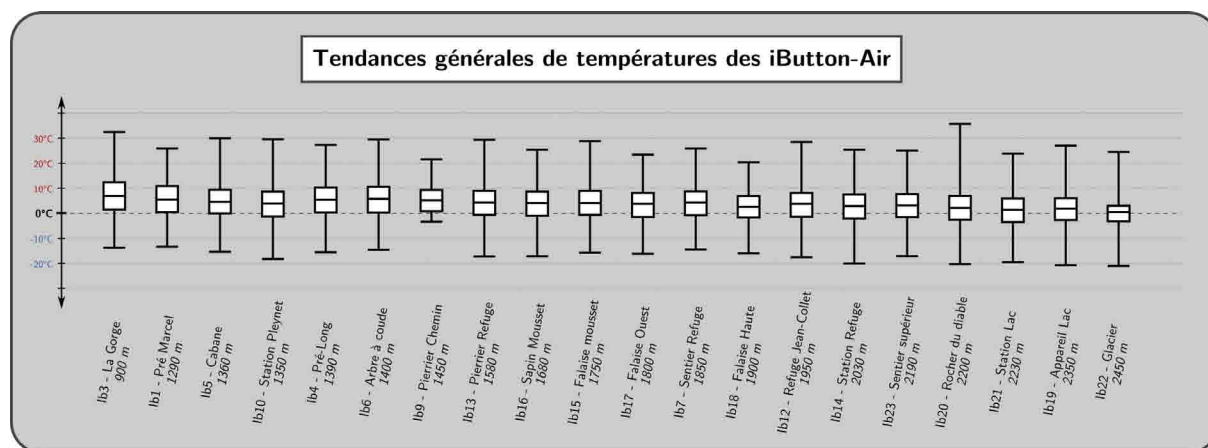


FIG. 4.8: Quelques caractéristiques des températures sur le Vorz calculées à partir des iButtons (moyenne, 1^{er} quartile, 3^{ème} quartile, maximum, minimum)

La moyenne des températures sur la période d'acquisition est de $3,5^{\circ}\text{C}$ pour une altitude moyenne du bassin de 1760 mètres. Au niveau de l'amplitude thermique, on atteint plus de 50°C annuellement avec des hivers très rudes et des étés pouvant être caniculaires, notamment dans la partie basse du bassin versant. Dans le même temps, les variations entre les différentes stations composant le réseau sont relativement les mêmes, puisque l'écart-type est de manière général compris entre 6 et 7°C .

Globalement, ces valeurs sont représentatives d'un bassin versant de moyenne à haute montagne, et, sont cohérentes du point de vue du gradient thermique. Les stations les plus chaudes sont donc celles situées à basse altitude, à l'exception de quelques unes pour lesquelles il conviendra de quantifier le rôle de la topographie, et de la morphologie locale, ainsi que de l'installation du support.

4.3. MESURE DU CHAMP DE TEMPÉRATURES : LES IBUTTONS :

4.3.2 Fiabilité et précision des mesures :

L'ensemble du réseau est soumis à des incertitudes de mesure, ainsi qu'à des probabilités non négligeables de faillite en raison du milieu contraignant dans lequel on évolue. Il convient donc de quantifier d'une part les pertes ayant eu lieu sur le réseau mais également d'analyser les données de calibration afin de quantifier la résolution et l'incertitude des iButtons en fonction de leur position et des conditions d'échantillonnage.

4.3.2.1 Statistiques de fonctionnement :

Les figures 4.9 et 4.10 présentent l'historique des enregistrements réalisés par les iButtons dans le sol et dans l'air. Ces taux de réussites ou d'échecs sont très variables d'un site à l'autre, en raison de plusieurs facteurs différents selon le type de iButton. Cependant, il est à noter qu'aucun dysfonctionnement des dispositifs de mesure n'a été observé tel qu'une dégradation par l'eau, l'humidité ou le gel, qu'aucun capteur n'a été perturbé par des problèmes d'acquisitions.

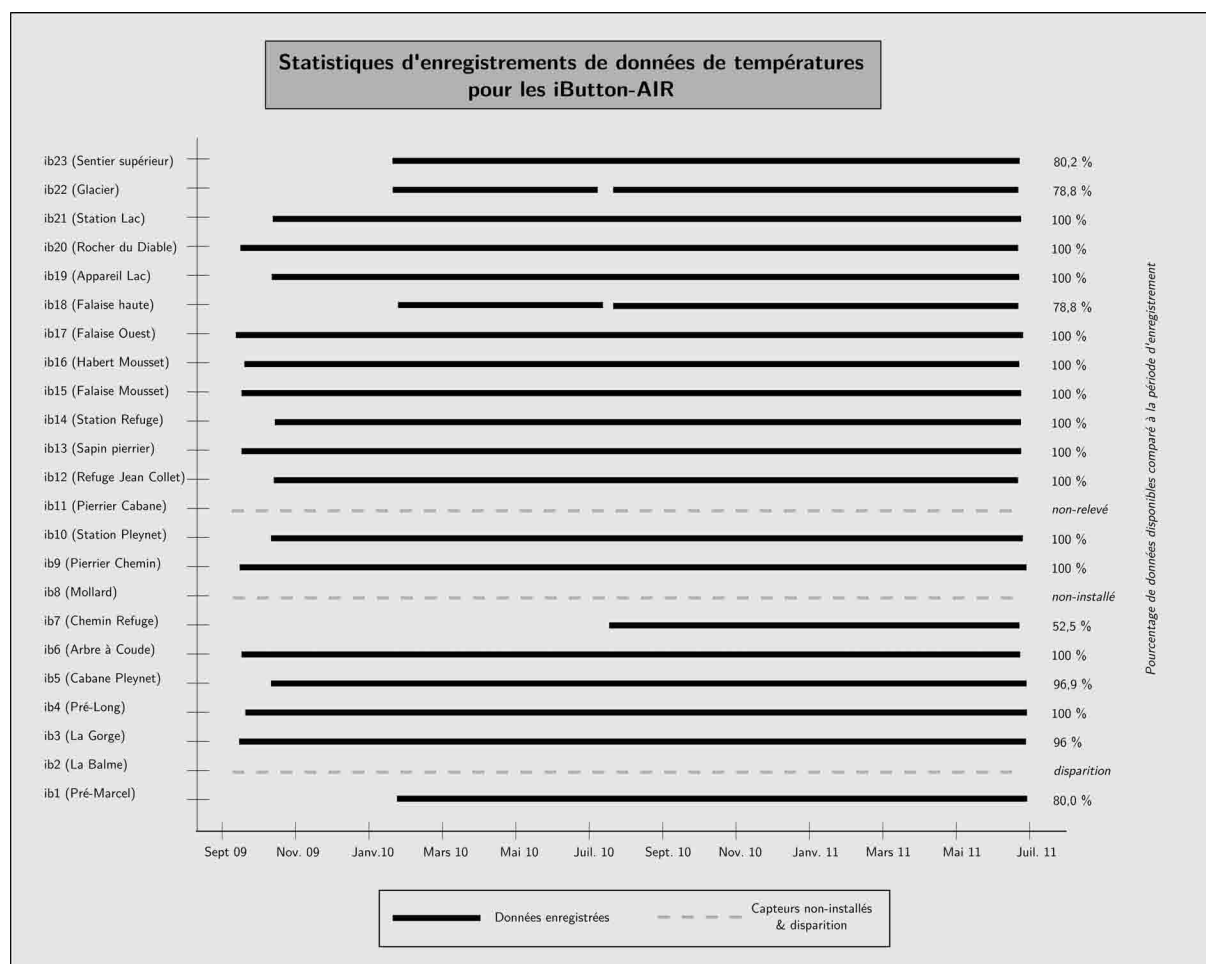


FIG. 4.9: Fonctionnement des iButton-Air

En ce qui concerne les iButtons de l'air, les problèmes essentiels auxquels nous avons dû faire face ont été principalement :

CHAPITRE 4. OBSERVATION HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE SUR LE VORZ, ANALYSE DE DEUX ANNÉES DE FONCTIONNEMENT :

- La disparition des capteurs (1 cas)
- Le recouvrement du capteur par la neige à certaines périodes, et ce, malgré des hauteurs parfois conséquentes en paroi (10 à 20 mètres), notamment pour 2 sites (*ib 18 et 22*)
- L'arrachement du capteur par des contraintes au niveau du support (dans un cas le support a été descellé du rocher par le manteau neigeux)

Pour certains capteurs, le début de la période d'instrumentation est manquant, en effet, en raison de la capacité mémoire des capteurs, il n'a pas été possible de récupérer ces données du fait de leur inaccessibilité durant la période hivernale. Cependant, dans la majeure partie des sites, nous observons un taux de réussite de plus de 80% et dans de nombreux cas de 100%. Ainsi, le réseau a parfaitement rempli son rôle et est opérationnel et utilisable pour l'interpolation des températures sur l'ensemble du bassin versant.

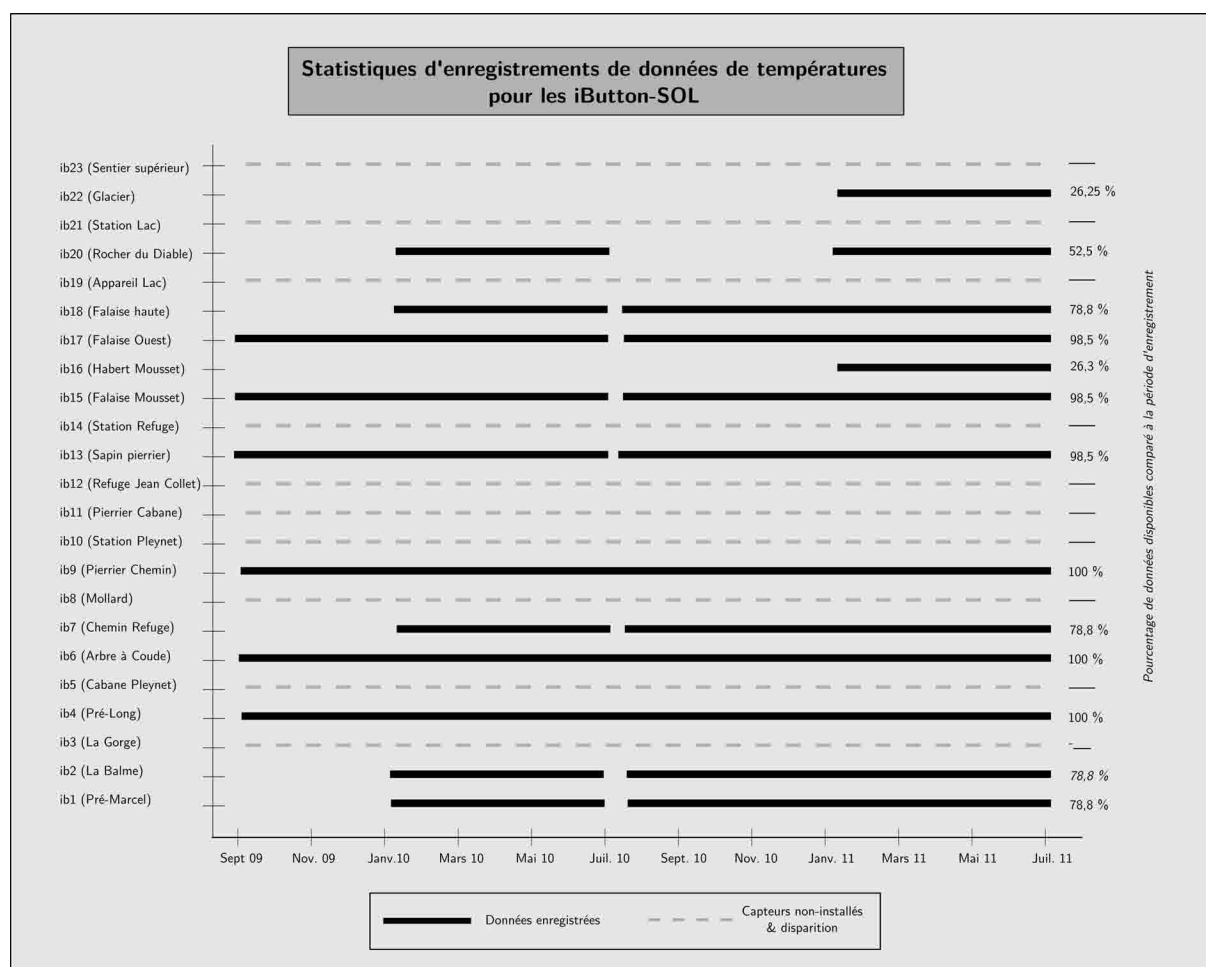


FIG. 4.10: Fonctionnement des iButton-Sol

Les iButtons sol étaient pour leur part moins nombreux à l'installation que ceux de l'air. Les chroniques sont dans plusieurs cas non-continues, notamment en raison du fait que recouvert par la neige, ils peuvent être inaccessibles pendant de très longues durées (près de 8 mois dans certains cas), et saturer ainsi la capacité mémoire. De la même manière que pour les iButton-Air, le début des chroniques est affecté de quelques gaps, en raison du taux

4.3. MESURE DU CHAMP DE TEMPÉRATURES : LES IBUTTONS :

d'échantillonnage trop sensible sélectionné en première approche et saturant trop rapidement la mémoire. De plus, certains iButtons étaient difficiles à retrouver dans certains cas (différents "installateurs") et n'ont pas enregistré la totalité de la période. Malgré tout, cette partie du réseau a également donnée entière satisfaction, puisqu'il s'agit essentiellement ici de s'intéresser à des dates précises (accumulation et fonte) que nous possédons dans quasiment 100% des cas.

4.3.2.2 Impact de la position du capteur :

A plusieurs reprises, la précision de mesure des iButton a été discutée et remise en question (*Hubbart, 2005, [62]*). Afin de quantifier les erreurs de mesures possibles, en particulier en fonction de la position du capteur (proche des rochers, accrochés au support,...), nous avons mené une expérience de calibration sur l'impact de la distance au support sur la mesure de la température. Les deux graphiques suivants (figures 4.11 et 4.12) présentent les résultats de cette étude. Le dispositif installé est le suivant. Plusieurs iButtons sont fixés sur un support à différentes distances d'un rocher (5, 10, 20 et 50 centimètres). La température est relevée heure par heure durant 6 mois.

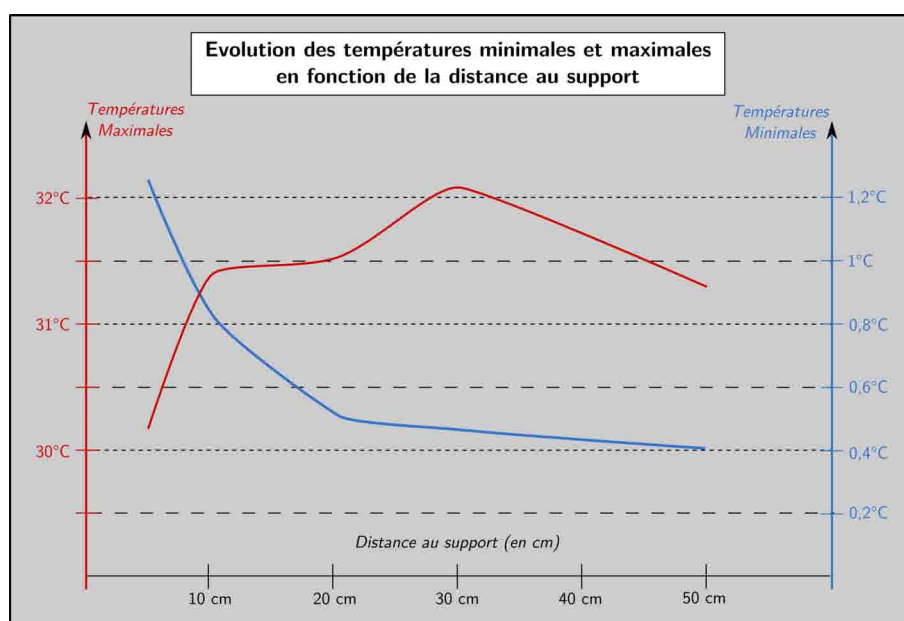


FIG. 4.11: Différences entre les températures minimales et maximales

L'étude des températures extrêmes (minimales et maximales) permet de mettre en évidence l'impact de la position du iButton durant les heures clefs de la journée. Ainsi, ce graphe met en évidence un impact réel de la position. En ce qui concerne les températures minimales, on observe une décroissance de la température au fur et à mesure de l'éloignement du support. Pour les températures maximales, le phénomène est exactement inverse. On peut expliquer ce phénomène par le rôle de "tampon" que va jouer le rocher tout proche. Ainsi, le matin, quand la température est froide, il va "isoler" la zone proche de lui en le réchauffant (restitution de la chaleur emmagasinée). Au contraire, durant les heures les plus chaudes, le rocher protège du soleil et de la chaleur les capteurs et limite leur température. Cependant, on constate qu'à

CHAPITRE 4. OBSERVATION HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE SUR LE VORZ, ANALYSE DE DEUX ANNÉES DE FONCTIONNEMENT :

partir de 30 à 50 centimètres, le phénomène est moins marqué et semble s'estomper.

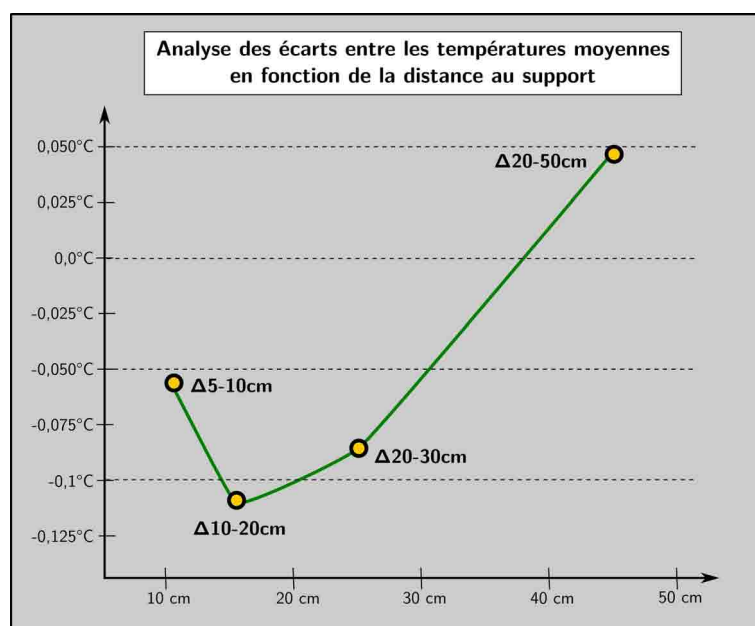


FIG. 4.12: Différence moyenne des températures en fonction de la distance au support

Les variations entre les différentes positions ont également été observées. Celles-ci sont en moyenne les plus fortes dans la zone proche du rocher, et, plus on s'éloigne de celui-ci, plus les variations entre les capteurs sont faibles, ainsi vers 40 centimètres, il semble que l'on puisse les considérer comme négligeables (de 0 à 0,05°C).

Cette rapide expérience a permis de mettre en évidence un impact de la position des iButtons par rapport aux supports. Ainsi, nous avons essayé dans la mesure du possible de limiter l'utilisation de rochers pour les fixer, puisqu'ils semblent avoir un impact sur la mesure. La deuxième précaution prise lors de l'équipement a été de construire et utiliser un support permettant de placer le iButton dans la circulation de l'air à 50 centimètres du support fixe.

4.3.2.3 Comparaison des résolutions et erreurs par rapport aux stations classiques :

La seconde source d'erreur majeure des capteurs iButton est liée à son isolement par rapport au milieu extérieur. Afin de limiter ces impacts, notamment celui du soleil, chaque iButton est placé dans une coque pastique de protection aérée, mais cela reste une protection différente des sondes de températures classiques. Ainsi, à la hauteur de chaque station météorologique équipée d'un capteur traditionnel, un iButton est placé pour analyser les différences de mesure et les quantifier.

Le tableau 4.10 présente les différences moyennes entre les stations traditionnelles équipées de capteurs homologués et les iButtons installés à proximité. De manière générale, sur l'ensemble de la période de mesure (octobre 2009 - juin 2011), les différences se chiffrent à moins de 1°C et sont généralement plus froides pour la station que pour le iButton. Il semble donc que celui-ci souffre quelque peu de l'influence du soleil qui le réchauffe plus que les stations qui sont isolées. De plus, il est important de noter que l'écart-type sur l'ensemble des mesures horaires est proche de 1°C, ce qui veut dire que cette faible différence est relativement constante dans

4.3. MESURE DU CHAMP DE TEMPÉRATURES : LES IBUTTONS :

le temps.

Le graphique 4.13 présente les différences horaires entre les deux types de capteurs. Il

Ecart de températures Station-iButton		
Stations	Ecart moyen	Ecart-type
Lac Blanc	-0,45 °C	1,57
Refuge	-0,38 °C	1,16
Pleynet	-0,16 °C	1,31
Moyenne	-0,33°C	1,35°C

TAB. 4.10: Différences de mesures entre les stations météorologiques classiques et les capteurs iButton

montre clairement l'oscillation de température journalière diurne-nocturne, mais également des différences de comportement entre les sites d'étude. Ainsi, les stations équipées de capteurs HOBO (Pleynet et Lac Blanc) présentent des différences positives durant la journée, tandis que la station Campbell (Refuge) présente de différences négatives. Ce phénomène s'explique par la structure différente des capteurs météorologiques utilisés. La station Campbell est un capteur classique, disposé à côté du pluviomètre et isolé par plusieurs capsules de protection, tandis que les thermomètres HOBO sont installés à l'intérieur des pluviomètres et sont donc susceptibles de subir des variations. Ainsi, durant la journée, ils sont réchauffés dans l'espace interne du pluviomètre par isolement et absence d'aération, et, durant la nuit, ils se refroidissent dans leur enceinte métallique qui "concentre" le froid.

Il est possible de tirer deux enseignements de ce graphe. Tout d'abord, le seul "véritable" capteur de température du versant est celui de la station Campbell du refuge qui semble correctement isolée et protégée. Il conviendra donc de prendre celle-ci comme la référence de la température. Les deux autres thermomètres ne sont quant à eux pas aussi fiables en terme d'incertitude de mesure liée à l'environnement.

Le second constat est que malgré des écarts à certaines heures de la journée entre les iButtons et les stations, celui-ci reste toujours très limité et inférieur à $1 - 1,5^{\circ}\text{C}$. Les iButtons restent donc relativement précis et constituent une bonne alternative aux capteurs classiques. De fait, nous pourrions les utiliser pour l'interpolation des températures, en insistant sur leur utilisation en valeur relative par rapport aux stations météorologiques que l'on pourra utiliser en valeur absolue.

CHAPITRE 4. OBSERVATION HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE SUR LE VORZ, ANALYSE DE DEUX ANNÉES DE FONCTIONNEMENT :

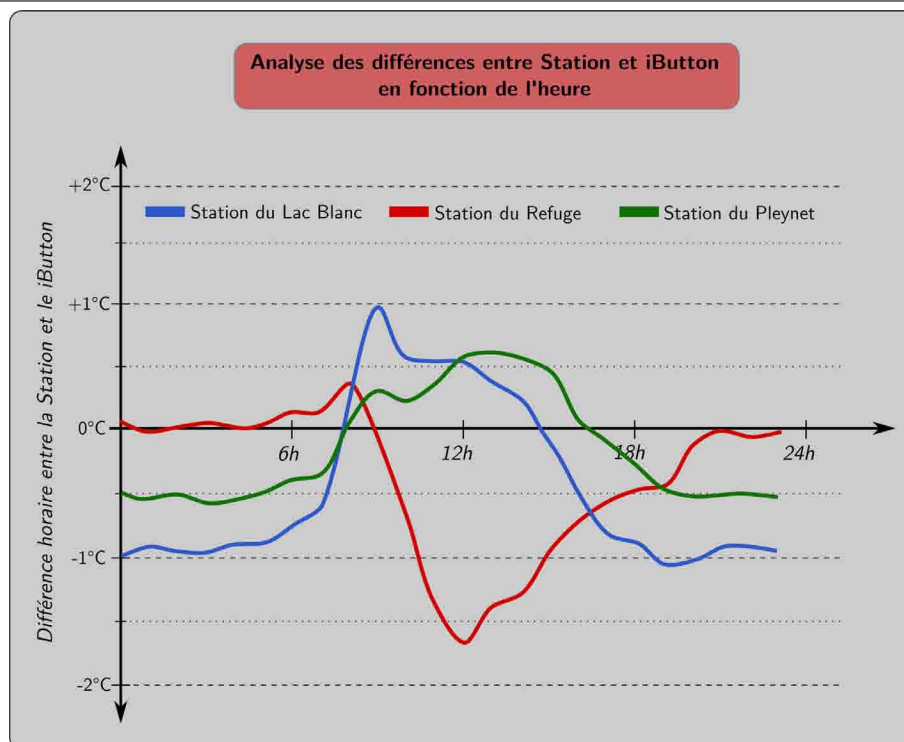


FIG. 4.13: Différences de mesures entre les Stations et les iButtons

4.3.3 Températures du sol :

Contrairement aux iButtons placés dans l'air qui seront utilisés de manière continue pour générer les cartes de températures, les iButtons situés dans le sol seront utilisés de manière ponctuelle. En effet, on se limitera dans un premier temps à les utiliser pour déterminer les dates de début d'accumulation de la neige et de fin de fonte du manteau neigeux. En effet, comme le montre la figure 4.14 les enregistrements des températures dans le sol sont marqués par de fortes indications de présence de neige durant la saison. En début de saison, lorsque le sol est à nu, on observe des variations proches de celles de l'air mais tamponnées par l'effet de protection dans le sol. Cependant, en hiver, la présence d'un manteau neigeux a deux conséquences : l'isolation du sol, l'empêchant ainsi de geler, et le tamponnage de la température. On observe donc sur le graphique la présence d'une longue période de non-oscillation des températures qui correspond en fait à la présence de neige à la hauteur du capteur. De plus, le démarrage et l'arrêt des oscillations est suffisamment rapide pour être détecté dans la plupart des cas à l'heure près, il sera donc extrêmement intéressant à utiliser pour contraindre le modèle neige futur.

4.3.3.1 Détermination des dates d'accumulation et fonte du manteau neigeux :

Sur la figure 4.14, on observe deux particularités marquantes. Tout d'abord dans la première saison, tout se passe correctement, avec la mise en place du manteau neigeux et sa fonte. Au cours du second hiver (2010/2011), les températures ne sont pas tamponnées immédiatement et décroissent de manière saccadées, au rythme des chutes de neige et de fontes rapides, jusqu'à ce que le sol atteigne son équilibre sous le manteau neigeux. En milieu de saison, on

4.3. MESURE DU CHAMP DE TEMPÉRATURES : LES IBUTTONS :

notera également le gel du sol en profondeur. Ce phénomène est probablement dû à un hiver relativement froid mais pauvre en neige. Ainsi, l'épaisseur du manteau neigeux a sans doute été insuffisante pour isoler le sol et celui-ci a gelé. Malgré tout, le graphique présenté ici permet pour les deux saisons passées de déterminer les dates précises de début d'accumulation et de fonte du manteau neigeux qui est présent au total pendant 4 mois par an.

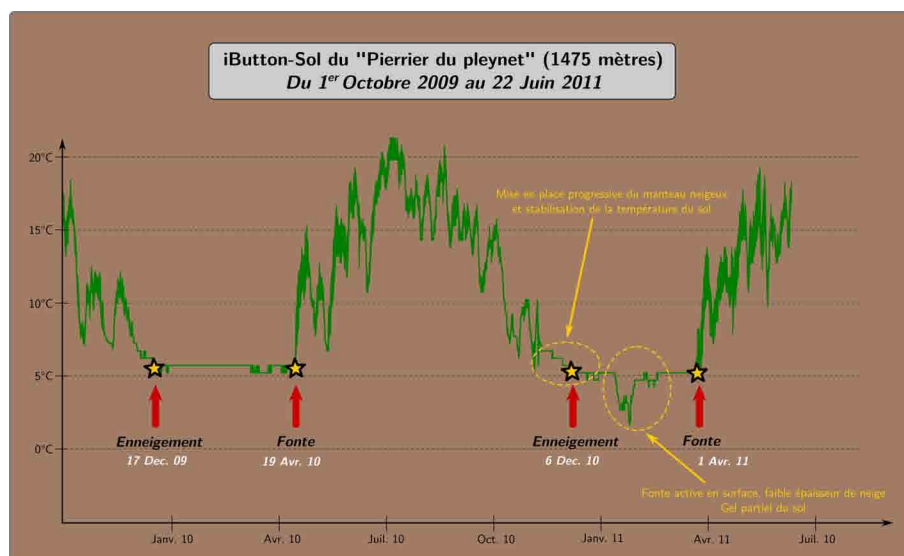


FIG. 4.14: Exemple d'enregistrement d'un iButton-Sol depuis 2 saisons

4.3.4 Températures dans l'air :

Comme on vient de la voir, la température de l'air est suivie en continu par 3 stations météorologiques, les iButtons permettent d'enrichir la représentativité spatiale de ce suivi. On utilisera ainsi, l'ensemble du réseau (20 capteurs) pour calculer sur le bassin le champ des températures par interpolation des données des iButtons. Au delà de leur capacité à donner des informations sur les phénomènes localisés tels que les courants thermiques locaux, les caractéristiques d'ensoleillement et d'effets d'ombres, ces capteurs nous permettent dans un premier temps de définir les caractéristiques générales du comportement des températures sur le Vorz.

4.3.4.1 Gradient thermique sur le Vorz :

Le gradient thermique est un élément essentiel en zone de montagne puisqu'il détermine en particulier les altitudes de fonte et accumulation de la neige. Même si celui-ci a déjà été calculé en première approche à partir des stations météorologiques, il est intéressant de refaire le travail à partir des iButtons, afin de mettre en évidence les disparités locales (exposition, altitude,...) pouvant se produire sur le bassin. La figure 4.15 présente la température moyenne des iButtons en fonction de leur altitude.

CHAPITRE 4. OBSERVATION HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE SUR LE VORZ, ANALYSE DE DEUX ANNÉES DE FONCTIONNEMENT :

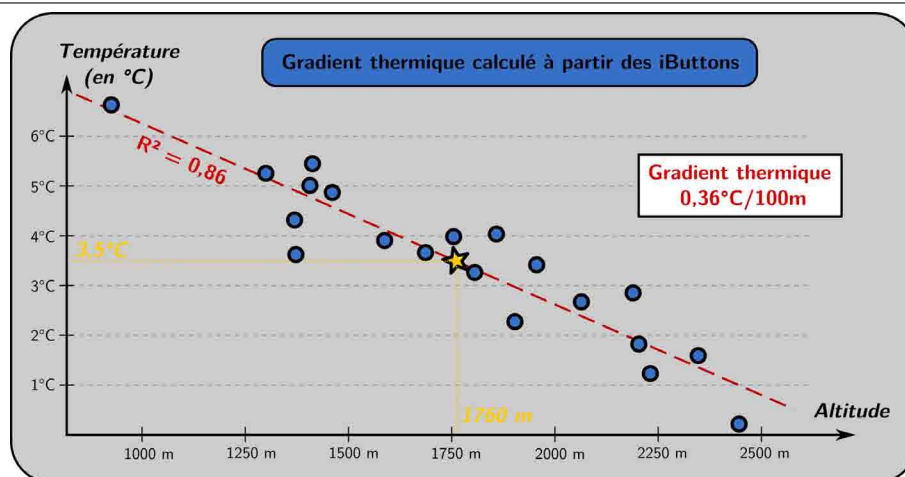


FIG. 4.15: Gradient thermique moyen sur le Vorz calculé à partir des iButtons

On remarque immédiatement sur le graphe que les iButtons ont tendance à s'aligner le long d'une droite décroissante en fonction de l'altitude, à l'image de ce que l'on avait constaté pour les températures. La calcul de la régression linéaire permet de déterminer un gradient altitudinal, ainsi que les tendances générales de la série. On obtient ainsi un bassin versant dont l'altitude moyenne est de 1750 mètres, pour une température moyenne sur la période étudiée de 3,5°, ce qui correspond particulièrement bien à ce qui a été mis en évidence avec les stations météorologiques, à l'erreur de mesure près (-0,33°C).

En ce qui concerne le gradient, on l'obtient par la pente de la droite qui donne une valeur de 0,36°C/100m, soit sensiblement la même tendance générale que ce qui avait été observé par les stations météorologiques. Ce constat nous amène à deux conclusions importantes. D'une part, il est possible d'utiliser les iButtons pour calculer les champs de températures sur le Vorz, et, d'autre part, l'utilisation des iButtons dans un réseau plutôt que des sondes températures classiques n'introduit pas d'erreurs majeures dans les données d'entrées des modèles.

4.3.4.2 Enregistrement de la course du soleil :

A partir des iButtons, on peut déterminer une tendance générale, cependant, l'intérêt premier est de mettre en évidence des caractéristiques locales des températures. Nous avons présenté dans le chapitre précédent les transects et profils disposés le long du bassin. Ceux-ci nous permettent d'analyser les phénomènes locaux tels que par exemple la course du soleil, et donc celle des ombres, sur le terrain. Le graphique suivant (cf. fig.4.16) présente les résultats du transect du Mousset orienté Nord-Est/Sud-Ouest à une altitude de 1700 à 1800 mètres. On représente les températures moyennes horaires relevées durant toute la période de mesure.

4.3. MESURE DU CHAMP DE TEMPÉRATURES : LES IBUTTONS :

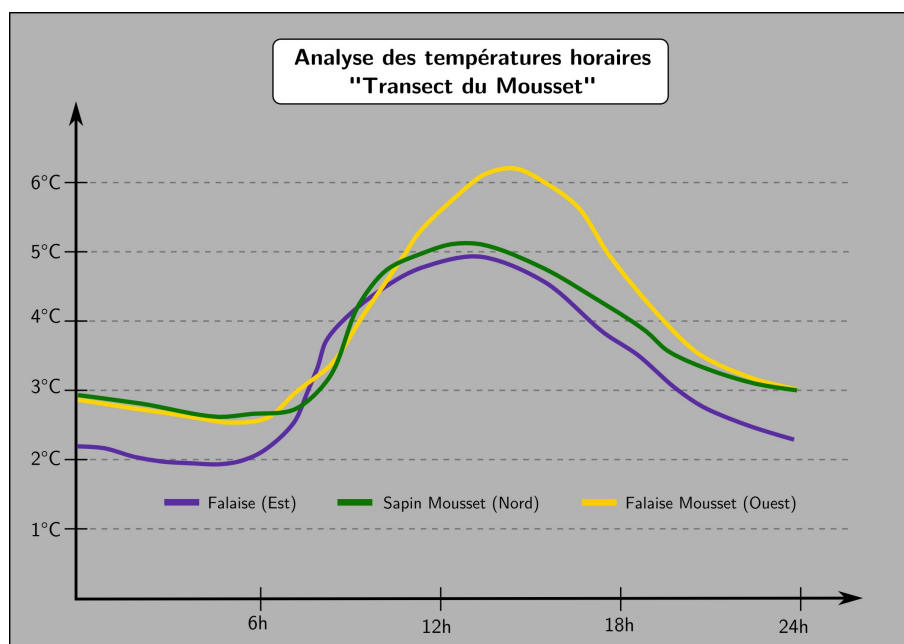


FIG. 4.16: Analyse des différences de température le long du Transect du Mousset

L'allure des trois courbes en cloches met en évidence des tendances différentes pour les trois sites qui sont exposés différemment. Ainsi, les deux sites exposés au Nord et à l'Est sont ceux qui sont le moins impactés par l'ensoleillement, puisque ce sont eux qui sont le plus protégé pendant la journée. Le température commence donc à monter relativement tôt, puisqu'ils sont éclairés les premiers par le soleil, mais, en raison de leur exposition qui les protège rapidement (encaissement dans le bassin et dans une direction opposée à celle du soleil d'après-midi), la température n'est jamais extrêmement élevée. Au contraire, le iButton exposé au sud-ouest lui, voit sa température augmenter tardivement, à la suite du lever de soleil tardif, mais celle-ci augmente plus intensément, le soleil étant déjà efficace à des heures plus avancées de la journée, et, atteint des valeurs plus fortes puisque la durée d'ensoleillement est plus importante avec un coucher de soleil tardif. Au final, on observe un décalage de 1 à 2 heures, suivant l'encaissement du bassin et la protection par les sommets alentours, entre les différents sites. La température absolue peut en moyenne être différente de 1 à 2°C.

La nuit, les différences sont beaucoup plus faibles et tiennent en réalité plus de la protection générale du site aux éléments extérieurs tels que la végétation, les falaises, l'humidité ou encore un abri du vent. Ainsi, la nuit, on pourra considérer que le facteur expositionnel est nul, et que, seul le facteur altitudinal peut être pris en compte.

4.3.4.3 Profils longitudinaux et transects :

Après avoir analysé les transects et gradient globaux, on peut essayer d'analyser les gradients locaux en fonction de l'exposition. Ainsi, au niveau des deux profils présentés dans le chapitre 3, on a réalisé une étude similaire à la précédente sur les différents sites de mesure au pas de temps horaire. Ces analyses mettent en évidence des comportements identiques à la tendance générale sur les deux profils Nord-ouest/Sud-est étudiés. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.11.

CHAPITRE 4. OBSERVATION HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE SUR LE VORZ, ANALYSE DE DEUX ANNÉES DE FONCTIONNEMENT :

Ecart de températures Station-iButton		
<i>Profil</i>	<i>Température moyenne</i>	<i>Gradient</i>
Profil Nord	3,2°C	-0,35 °C/100m
Profil Nord-Ouest	2,9°C	-0,40 °C/100m
Moyenne	3,05°C	0,375°C

TAB. 4.11: Températures moyennes et gradients sur les profils longitudinaux du Vorz

Le tableau met en évidence des températures moyennes plus faibles que la température générale, comme cela était attendu au vu de l'exposition. De plus, les gradients sont plus faibles pour l'exposition nord qui de plus est située le long du torrent dans une zone en grande partie protégée du soleil pendant la journée. Ainsi, on observe quelques différences cohérentes par rapport à la tendance générale au vu de l'exposition, mais, ces données viennent confirmer le potentiel d'utilisabilité du réseau iButton pour mettre en évidence les variations spatio-temporelles des températures sur le bassin.

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 4 :

Le réseau de mesure hydrométéorologique du Vorz possède aujourd'hui près de deux années d'expérience. Au cours de ces deux années, nous avons vu que malgré quelques difficultés de fonctionnement de certains capteurs, notamment en raison du froid, ou des difficultés d'accès en hiver, le fonctionnement du réseau est très satisfaisant. Dans l'ensemble, les performances d'acquisition sont largement supérieures à 80% et avoisinent les 100% dans la plupart des cas. Cette richesse de données, va donc nous permettre d'envisager sereinement les interpolations de températures et de précipitations qui vont être réalisées sur le bassin versant (cf. Troisième Partie).

Au niveau climatique, on a pu déterminer que le bassin versant était soumis à de forts contrastes thermiques et pluviométriques, en particulier en raison de sa topographie spécifique. De plus, l'altitude et l'exposition de ses différentes zones viennent amplifier ce phénomène de variabilité, et lui confère une grande hétérogénéité spatiale et temporelle. Malgré tout, il est possible de quantifier quelques tendances générales, avec notamment :

- Un gradient pluviométrique général négatif (plus faible en altitude)*
- Aucune présence de gradient régulier lors des épisodes pluviométriques ponctuels*
- Un gradient thermique négatif de $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$*
- Une difficulté à mettre en avant des tendances liées à l'orientation seule*
- Une rareté des phénomènes de crues et forts débits observés sur le Vorz*

Ce chapitre a donc permis de quantifier les premiers éléments généraux du climat du bassin versant du Vorz. Compte tenu des performances du réseau d'instrumentation, il permet d'envisager sereinement les futurs interpolations climatiques qui seront menées à haute résolution spatiale et temporelle.

Comme cela était mentionné dans le chapitre 3, la nivologie fait l'objet du développement d'un capteur particulier. Les performances et résultats de ce capteur seront présentées dans les chapitres suivants au sein de la seconde partie du mémoire, qui présentera la conception et l'utilisation du capteur SnoDEC.

Deuxième partie:

Développement d'un capteur automatique à visée cartographique de la couverture neigeuse :

Chapitre 5:

Principe du capteur SnoDEC :

Sommaire du Chapitre:

5.1 Principe du capteur SnoDeC :	141
5.1.1 Génèse du principe d'échantillonnage ponctuel à haute résolution spatiale et temporelle :	141
5.1.2 Une idée centrale : La détection des zones enneigées :	142
5.1.3 Un challenge technique : La transformation d'une image 2D en cartographie 3D :	142
5.2 Caractéristiques techniques du capteur :	144
5.2.1 Cahier des charges :	144
5.2.2 Constitution générale du capteur :	144
5.2.3 Caractéristiques de l'appareil photographique : Pentax K200D	144
5.2.4 Coût global du capteur :	145
5.3 Sites instrumentés sur le Vorz :	147
5.3.1 Installation des appareils :	147
5.3.2 Appareil photographique du Lac Blanc (2250 mètres) :	147
5.3.3 Appareil photographique du Refuge Jean-Collet (1950 mètres) :	149
5.4 Structure finale du système SnoDEC :	150

Introduction du Chapitre 5 :

La disponibilité d'informations sur les surfaces enneigées en temps réel constituerait une amélioration fondamentale dans la compréhension des phénomènes nivologiques, mais également dans la contrainte des modèles hydrologiques. Dans la première partie, on a vu que cette couverture neigeuse était variable spatialement et temporellement, et que plusieurs techniques sont utilisables pour mesurer et quantifier cette variabilité. Cependant, nous sommes confrontés à un dilemme, puisque certaines techniques permettent d'obtenir une bonne résolution spatiale (satellites,...) tandis que d'autres apportent une résolution temporelle adaptée au pas de temps journalier (télénivomètres,...). Pour notre part, nous souhaitons associer les avantages des différentes techniques d'imageries, et, l'idée de développer un appareil innovant a finalement émergée.

Ce projet a été baptisé SnoDEC (Système Nivologique Opérationnel de Détection de l'Enneigement), et a pour objectif de combiner une haute résolution spatiale (inférieure à la dizaine de mètre, voir au mètre), et une forte résolution temporelle (infra-journalière), tout en conservant une surface de couverture conséquente et adaptée aux petits bassins versants de montagne. Ainsi, on combinera à la fois les avantages des satellites à haute résolution spatiale (Landsat, Quickbird,...), et ceux à haute résolution temporelle (Spot, Modis, météorologiques,...).

Dans ce chapitre, nous allons présenter en détails les raisons qui nous ont poussé à développer ce système de mesure innovant, et quels en sont les principaux avantages. Dans un second temps, nous verrons que pour fonctionner efficacement dans les milieux tels que la haute montagne, le matériel doit être adapté, tout en respectant un cahier des charges précis et des contraintes de coût. Ce matériel, dont nous discuterons les caractéristiques techniques a été disposé sur le bassin versant du Vorz. Il permet d'obtenir des données satisfaisantes depuis deux sites distincts que nous présenterons. Enfin, nous aborderons la problématique du traitement des données et de la chaîne de traitement qu'il est nécessaire de mettre en place pour passer des images brutes aux cartographies d'enneigement.

Section 5.1

Principe du capteur SnoDeC :

5.1.1 Génèse du principe d'échantillonnage ponctuel à haute résolution spatiale et temporelle :

Dès lors que l'idée d'un capteur autonome *in-situ* s'est imposée, il a été nécessaire de définir les capacités attendues de ce capteur en terme d'échantillonnage de données nivologiques. Plusieurs idées ont été avancées et considérées en terme de rentabilité et d'efficacité; l'idée forte étant que ce capteur devait être développé dans un délai relativement court, afin de pouvoir réaliser l'installation dès la fin de l'été et l'exploitation dès le mois de novembre. Parmi ces idées de mesures possibles, on peut citer :

- La mesure automatique des surfaces enneigées sur le versant
- La détection des hauteurs de neige
- La caractérisation du manteau neigeux, notamment par le type de neige présent ou son humidité
- Les zones affectées par les vents (accumulation, ablation)
- Les phénomènes avalancheux

Bien évidemment, toutes ces possibilités d'instrumentation n'ont pas été explorées, notamment en raison du temps de développement de tels systèmes automatiques (hauteur de neige), mais également pour des raisons de problématique finale (avalanche, vent), ou encore de par la limitation des capacités de mesure du capteur (l'humidité du manteau neigeux aurait nécessité par exemple la mise en place d'un filtre infra-rouge).

Au final, l'utilisation principale retenue pour ce capteur, puisqu'elle semblait être celle apportant le plus d'informations ponctuelles, est : **la caractérisation des surfaces enneigées à haute résolution spatiale.**

Parallèlement à cette analyse spatiale du manteau neigeux sur le bassin versant, il était nécessaire de définir le pas de temps de mesure pour le capteur. L'objectif étant la caractérisation de la neige, et compte tenu de la vitesse d'évolution de celle-ci sur le versant (relativement lente), il a été décidé de travailler sur un pas de temps infra-journalier, notamment pour la période de fonte durant laquelle on peut observer des évolutions notables à cette échelle de temps. De plus, le temps étant très variable en zone de montagne, il est possible que celui-ci ne soit pas constant au cours de la journée. L'idée essentielle étant de mesurer à haute résolution temporelle, il a été décidé de réaliser plusieurs prises de vues par jour, afin de maximiser la probabilité d'obtention d'une image exploitable, c'est-à-dire avec un minimum de couverture nuageuse.

A partir de cette idée, le nombre de prises de vues journalières a essentiellement été imposé par la capacité de stockage de l'appareil. Sachant que l'un des facteurs essentiels de fonctionnement est la non-intervention régulière d'un opérateur sur l'appareil, le pas de temps final a été déterminé en fonction de l'autonomie d'enregistrement souhaitée : à savoir au minimum 8 mois, temps durant lequel les conditions de neige font que l'accès au capteur peut être délicat ou dangereux.

A ce stade de l'étude, une réflexion a été menée sur la capacité énergétique probable de l'appareil. En effet, la durée du jour, les températures, l'humidité, influencent fortement les capacités

5.1. PRINCIPE DU CAPTEUR SNODEC :

des batteries, ainsi que leur potentiel de recharge par le panneau solaire. La consommation énergétique étant limitée au strict minimum, il semblait possible de prendre plusieurs images par jour, tout en gardant une marge de réserve pour les périodes de mauvais temps durant lesquelles la recharge est impossible.

Nous avons finalement retenu comme pas de temps d'échantillonnage, une durée infra-journalière, remplissant ces conditions de stockage et de coût énergétique : **5 à 7 images par jour conférant au système une haute résolution temporelle.**

5.1.2 Une idée centrale : La détection des zones enneigées :

La tâche majeure du capteur sera de quantifier et caractériser le couvert nival sur le versant. Compte tenu du nombre d'images qui vont être acquises sur le bassin (théoriquement entre 1800 et 2600 par site et par saison), l'extraction des données devra se faire automatiquement, et il sera donc nécessaire de développer un algorithme de traitement. Dans les prochaines parties (cf chap. 7 & 8), seront détaillées les mécanismes permettant de réaliser un tel outil. Celui-ci sera développé avec la contrainte opérationnelle de pouvoir obtenir une image utilisable chaque jour, lorsque la couverture neigeuse le permet.

La première étape de fonctionnement de ce capteur sera donc la détection automatique de la neige sur les images acquises automatiquement sur le bassin.

La couverture spatiale des mesures en rapport avec la taille totale du bassin est également essentielle. Afin de satisfaire des conditions d'échantillonnage acceptables, il a été décidé d'instrumenter la zone clef du fonctionnement hydrologique du bassin versant (zone probable de déclenchement de la crue de 2005), constituée par la partie sommitale du versant, et, d'instrumenter avec un deuxième appareil la partie médiane du bassin. Finalement, deux appareils ont été placés sur le bassin :

- Site 1 : Vallon du Lac Blanc (2250 mètres)
- Site 2 : Refuge Jean-Collet (1950 mètres)

5.1.3 Un challenge technique : La transformation d'une image 2D en cartographie 3D :

Lorsque la neige a été correctement détectée dans les images, une grande partie du travail est effectuée. Cependant, pour pouvoir créer une base statistique spatiale sur le manteau neigeux (surface, altitude, orientation,...), il convient de replacer la photographie dans sa position réelle sur le terrain, c'est-à-dire passer d'une image en 2D à des informations en 3D. Cette tâche constitue la deuxième opération effectuée par le capteur SnoDEC, et doit elle aussi être réalisée automatiquement, au vu du nombre d'images à traiter. Les techniques mathématiques, géométriques et algorithmes utilisées pour ce travail sont détaillées ultérieurement (cf chapitre 6). La contrainte essentielle dans ce travail sera d'obtenir des données dont la résolution spatiale sera au minimum inférieure à la grille des modèles sur lesquelles nous allons travailler par la suite, c'est à dire inférieure à une dizaine de mètres.

La deuxième étape de fonctionnement de ce capteur sera donc la cartographie automatique de la neige en 3D à partir des images acquises automatiquement.

La réalisation de cette étape est également conditionnée par la qualité des données à partir desquelles sera créée la transformation 3D, et, l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain à haute résolution est nécessaire. Dans notre étude, nous utiliserons un modèle réalisé

CHAPITRE 5. PRINCIPE DU CAPTEUR SNODEC :

par interférométrie radar et dont la grille de résolution est de 2 mètres en planimétrie et de quelques centimètre en altimétrie.

5.2. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU CAPTEUR :

Section 5.2

Caractéristiques techniques du capteur :

5.2.1 Cahier des charges :

L'instrumentation en milieu de montagne présente de nombreuses contraintes, notamment en terme d'approvisionnement en énergie. En ce qui concerne les appareils photographiques numériques que nous avons installés, l'alimentation en énergie est assurée par la recharge d'une batterie par l'intermédiaire d'un panneau solaire. Ainsi, la localisation de l'installation de l'appareil a été réalisée en fonction de l'orientation possible pour le panneau solaire. La recharge de la batterie s'effectue dès que l'énergie solaire est exploitable, tandis que l'utilisation de celle-ci permet de tenir plusieurs semaines en autonomie complète pour quelques prises de vues journalières.

L'idée de base du système est de fournir un maximum d'informations pour un minimum de coûts. Nous avons donc opté pour un système de prise de vue classique, à savoir un appareil photo numérique reflex grand public de bonne qualité. La prise de vue est déclenchée par "timer" programmable 5 ou 7 fois par jour entre 7h et 19h. Aucune prise de vue n'est effectuée durant la nuit et l'intervalle de temps 7h-19h permet de ne pas perdre trop d'image durant l'hiver à cause de la nuit, tout en gardant une couverture maximale durant les plus longues journées de printemps et d'été, qui sont essentielles dans les mécanismes de la fonte des neiges.

5.2.2 Constitution générale du capteur :

La composition technique du capteur SnoDeC est relativement simple et utilise au maximum des éléments présents sur le marché grand public. L'élément principal est constitué par l'appareil numérique d'une résolution de 12MPix et de carte mémoire 8Go. Afin d'isoler ces appareils de l'environnement extérieur, une boîte étanche munie d'une vitre en plexiglas et permettant la fixation à une paroi est utilisée. Les sites ont été choisis de manière à pouvoir placer l'appareil suffisamment haut au-dessus du sol, afin qu'il ne soit pas recouvert durant l'hiver. Enfin, l'alimentation énergétique est assurée par une batterie "classique" rechargée dès que cela est possible par un panneau solaire placé à quelques mètres du boîtier. Les éléments indispensables de ce capteur sont donc (cf figure 5.1) :

- 1 Appareil photographique numérique : Canon Rebel XS (1000D)
- 1 boîtier de protection étanche avec vitre en plexiglas et système de scellement au rocher
- 1 panneau solaire (5 watt) + chargeur associé
- 1 batterie de stockage (Li-ion) + convertisseur
- 1 timer programmable (DigiSnap 2700)
- 2 Cartes mémoire SDHC 8Go (simple changement effectué par l'opérateur lors des visites de contrôle)

5.2.3 Caractéristiques de l'appareil photographique : Pentax K200D

L'appareil photographique numérique sélectionné pour le capteur SnoDeC se devait d'être un appareil doté d'une très bonne résolution d'images. De plus, de manière à obtenir un angle

CHAPITRE 5. PRINCIPE DU CAPTEUR SNODEC :



FIG. 5.1: Elements principaux du capteur SnoDEC

de vue le plus large possible, une grande gamme de réglage de focale était indispensable. En ce qui concerne la mise au point et les réglages spécifiques possibles, ceux-ci sont des éléments secondaires, puisque la mise au point est réalisée lors de l'installation et reste constante durant toutes les prises de vues, afin de ne pas faire varier les intensités lumineuses et de travailler sur des valeurs constantes. Cette spécificité s'avèrera indispensable dans les étapes suivantes, notamment lors de la détection des zones enneigées qui deviendrait extrêmement compliquée à appliquer sur des images à réglage de luminosité variable (contre-jour, surexposition, flou,...).

Ainsi, les caractéristiques techniques de l'appareil sont les suivantes : **Pentax K200D (5.2)** :

- Appareil numérique Reflex autofocus
- Résolution : 10,2 MPix
- Taille du capteur : 23,5mm x 15,7mm
- Taille images : 3872 x 2592
- Focale : 18-55mm
- Alimentation et autonomie : 4 piles AA (*en théorie non utilisées*) → 1100 images

5.2.4 Coût global du capteur :

L'objectif principal de cette technique d'échantillonnage est de diminuer les coûts d'instrumentation. Ainsi, pour une somme raisonnable, on peut équiper plusieurs sites, et, une fois l'équipement réalisé, la durée de vie est importante et l'entretien relativement faible. Le coût

5.2. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU CAPTEUR :



FIG. 5.2: Appareil numérique Pentax K200D

	Prix \$US	Prix €
Timer/Programmeur	150 \$	115 €
Câbles	100 \$	75 €
Batterie	100 \$	75 €
Appareil	600 \$	475 €
Memoire	60 \$	50 €
Autres (panneau solaire,...)	1000 \$	750 €

TAB. 5.1: Tableau des coûts des composants du capteur SnoDEC

d'un appareil complet et fonctionnel est de envion 2000 € (2550 \$US). Les détails des prix des différents composants du capteur sont exposés dans le tableau 5.1.

CHAPITRE 5. PRINCIPE DU CAPTEUR SNODEC :

Section 5.3

Sites instrumentés sur le Vorz :

Le choix des sites a été réalisé en tenant compte de plusieurs paramètres, à partir du nombre de capteurs que nous avons décidés d'installer, en l'occurrence deux. En premier lieu, l'orientation de la prise de vue, et la zone visée ont été privilégiées. Dans un second temps, les lieux potentiels d'installation ont été explorés sur le terrain, afin de vérifier la compatibilité avec la vision escomptée. Enfin, les difficultés d'accès, possibilités d'ancrages solides et protégés, ainsi que les potentiels de recharge des batteries (exposition au soleil), ont été pris en compte pour déterminer le lieu final d'installation. Il existe donc deux sites de mesure équipés du capteur SnoDEC sur le bassin versant, qui sont présentés ci-dessous.

5.3.1 Installation des appareils :

Cette étape constitue un facteur important dans le bon fonctionnement du capteur. En effet, il est important de le placer de manière adéquate et de le fixer solidement à la paroi, dans une position où l'éclairage est suffisant pour permettre la recharge des batteries avec le panneau solaire. De plus, c'est à ce moment que le cadrage de la photo, déterminant la couverture finale est effectué. Cependant, afin de pouvoir obtenir les meilleures conditions de fonctionnement possible (observation, ensoleillement), il n'est pas toujours facile de procéder à l'installation du capteur, ainsi qu'à son entretien, comme en témoigne les images suivantes (5.3) :



FIG. 5.3: Installation du capteur SnoDEC sur le terrain : Contraintes des milieux de montagne

5.3.2 Appareil photographique du Lac Blanc (2250 mètres) :

Le site du lac Blanc permet d'observer la partie haute du bassin versant. Cette zone est essentielle dans son comportement hydrologique, puisqu'elle est le lieu probable de la genèse de la crue de 2005. Outre ce rôle hydrologique majeur, elle est également le siège de la majeure partie du stockage de la neige, ainsi, que du Glacier de Freydane (cf fig. 5.4). La particularité de ce site est donc de présenter une couverture glaciaire tout au long de l'année (glacier de Freydane), mais également une couverture neigeuse importante jusqu'aux mois de juillet ou

5.3. SITES INSTRUMENTÉS SUR LE VORZ :

août.

Depuis le site de prise de vue, on observe ainsi l'ensemble de la partie sommitale du bassin versant avec un étagement altitudinal important, depuis le Lac Blanc (2175 mètres), jusqu'au sommet du Grand Pic de Belledonne (2977 mètres). Les caractéristiques techniques du site sont détaillées dans le tableau ci-dessous (tab.5.2).

Site 1 : Vallon du Lac Blanc	
Altitude	2250 m
Exposition	Sud-ouest (" <i>exposé au soleil</i> ")
Nombre de Photos/jour	7 Photos/jour (7am - 7pm)
Pas de temps	$\Delta T = 2h$
Résolution	10 MPix (3872 x 2592)
Nb Images/an	2555 images
Date mise en service	6 Octobre 2009
Surface explorée	Environ 5km ²
Temps/dénivelé accès	900m / 2h

TAB. 5.2: Caractéristiques physiques du Site du Lac Blanc

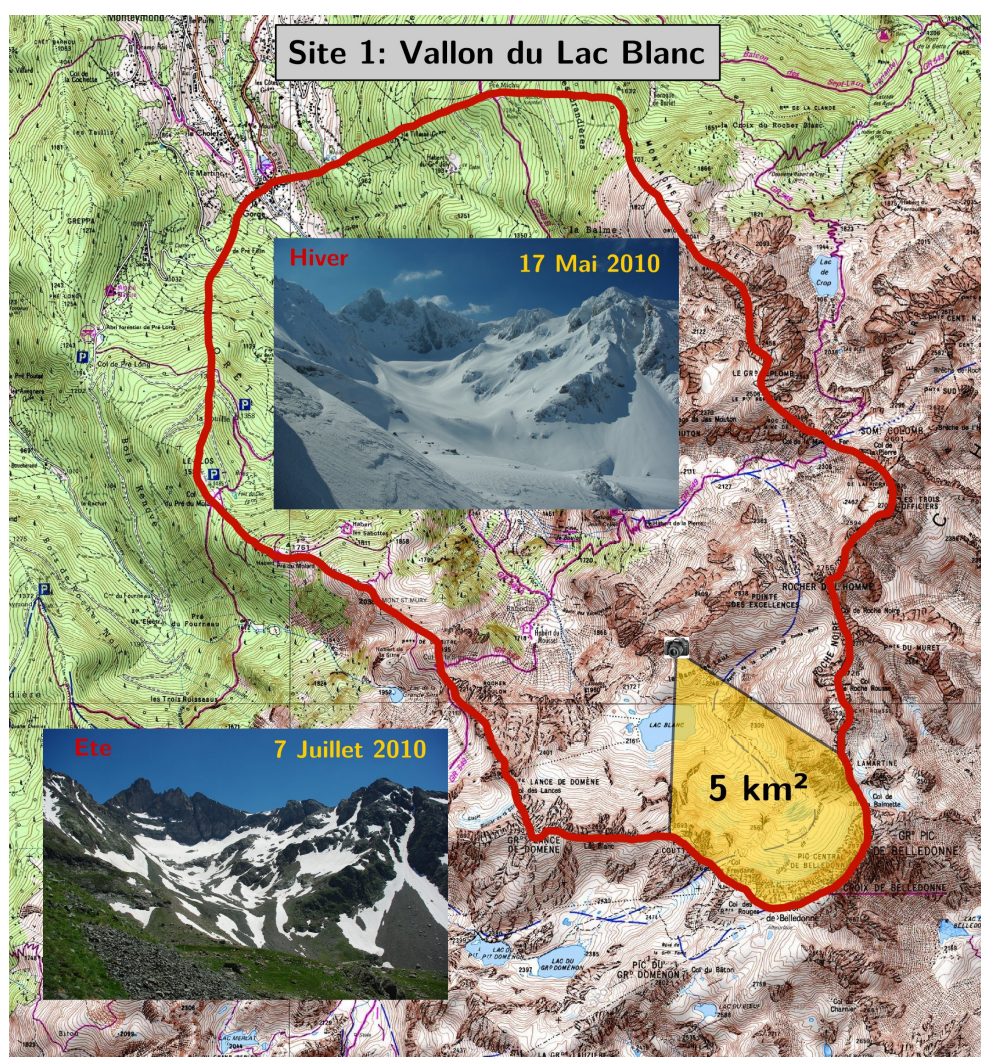


FIG. 5.4: Carte du site du Lac Blanc et exemple d'images obtenues avec le capteur SnoDEC

CHAPITRE 5. PRINCIPE DU CAPTEUR SNODEC :

5.3.3 Appareil photographique du Refuge Jean-Collet (1950 mètres) :

Le site du Refuge Jean-Collet permet d'observer la partie médiane du bassin versant. Ainsi, la couverture neigeuse y est moins présente tout au long de l'année (novembre à juin environ), mais cette zone a un rôle hydrologique important puisqu'elle constitue le lieu de concentration des écoulements du versant, avec pas moins de 3 vallons qui confluent à ce niveau : Vallon du Lac Blanc, Vallon de la Sitre et Vallon de la Mîne de Fer / Pointe des Excellences (cf fig. 5.5).

Depuis ce site, l'étendue altitudinale est également importante avec l'observation du Replat du Mousset (1700 mètres) jusqu'à la Point de la Sitre (2195 mètres) et de la Petite Lance de Domène (2596 mètres). Les caractéristiques techniques du site sont détaillées dans le tableau ci-dessous (tab.5.3).

Site 2 : Refuge Jean-Collet	
Altitude	1950 m
Exposition	Ouest (" <i>protégé du soleil</i> ")
Nombre de Photos/jour	5 Photos/jour (7am - 7pm)
Pas de temps	$\Delta T = 3h$
Résolution	10 MPix (3872 x 2592)
Nb Images/an	1825 images
Date mise en service	6 Octobre 2009
Surface explorée	Environ $5km^2$
Temps/dénivelé accès	600m / 1h30

TAB. 5.3: Caractéristiques physiques du Site du Refuge Jean-Collet

5.4. STRUCTURE FINALE DU SYSTÈME SNODEC :

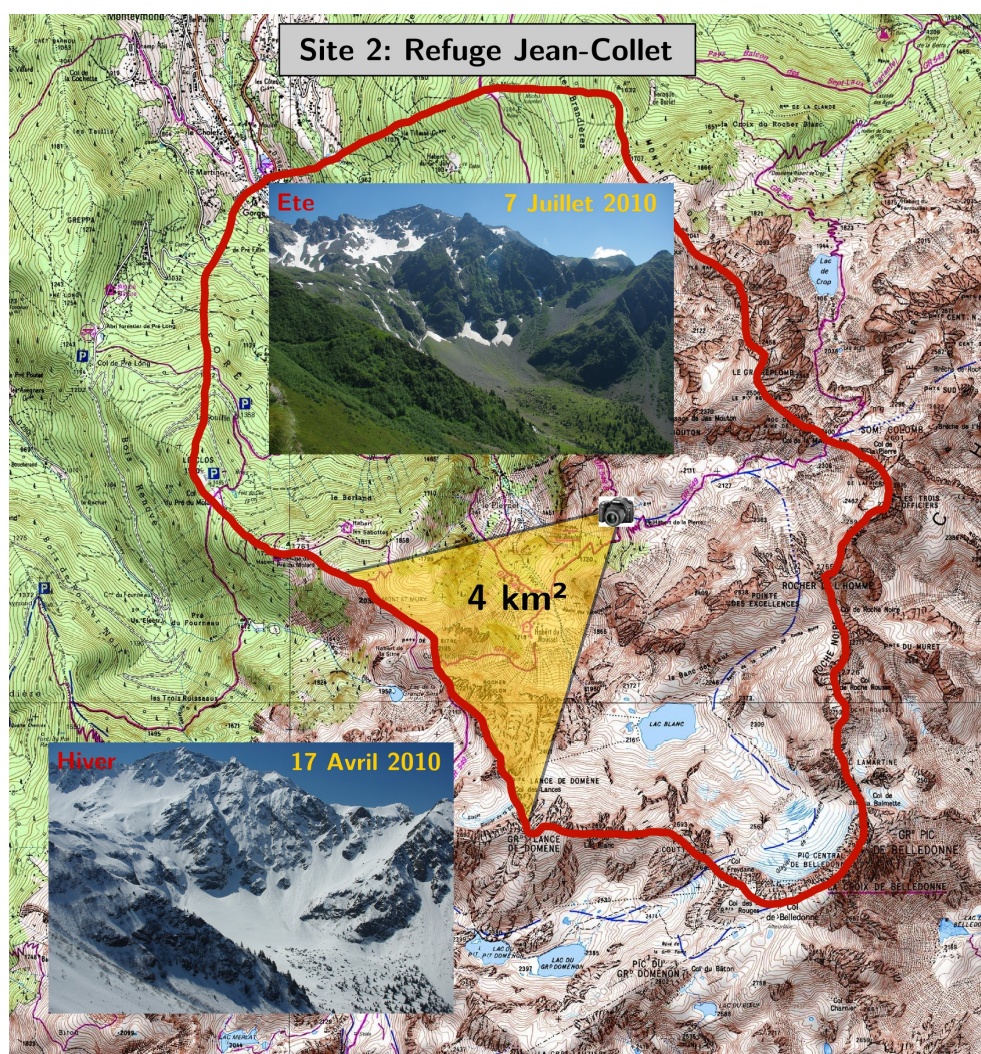


FIG. 5.5: Carte du site du Refuge et exemple d'images obtenues avec le capteur SnoDEC

Section 5.4

Structure finale du système SnoDEC :

A partir de l'ensemble des spécifications définies dans les parties précédentes, il est maintenant possible de construire la structure générale du système SnoDEC. Celui-ci se décompose donc en plusieurs étapes distinctes :

1. Acquisition des images sur le terrain
2. Stockage et sélection des images utilisables
3. Détection automatique de la neige sur les images
4. Transformation $2D \Leftrightarrow 3D$ des images
5. Cartographie finale de la couverture neigeuse

L'ensemble de ces étapes est organisé dans le schéma structurel suivant (fig. 5.6).

CHAPITRE 5. PRINCIPE DU CAPTEUR SNODEC :

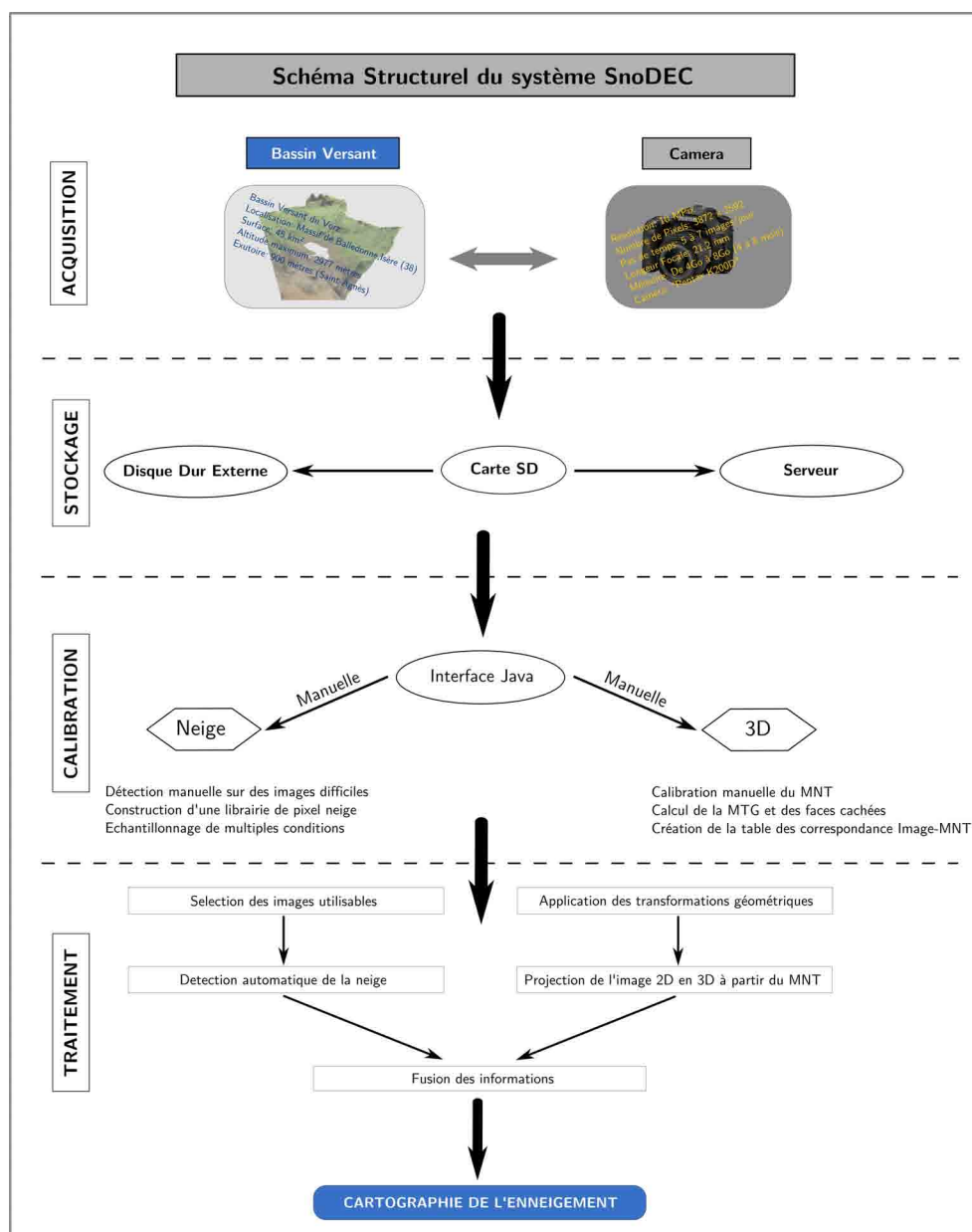


FIG. 5.6: Schéma structurel du système SnoDEC

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 5 :

Le système SnoDEC couvre deux secteurs du bassin versant de 5km^2 , sur les 20 que compte le bassin choisi pour l'étude (exutoire à la prise d'eau). On est donc dans une gamme de couverture plus faible que celle pouvant être obtenue par satellite, mais qui reste largement convenable au regard du ratio de couverture global (25%). La résolution spatiale des surfaces couvertes est en revanche très intéressante, puisqu'elle est inférieure à la dizaine de mètres dans la plupart des zones du versant et nous permet de travailler à haute résolution. La résolution temporelle quant à elle vient largement compenser le léger désavantage en terme de couverture puisque nous obtenons une image toute les 2 ou 3 heures sur le versant, ce qui est inenvisageable avec des systèmes d'imageries autres.

Le matériel installé sur le versant est à un coût abordable, puisque le système complet pour instrumenter un site vaut moins de 2000 euros. Les appareils photographiques utilisés sont des appareils réflex grand public et permettent d'appliquer la technique sur n'importe quel bassin versant. L'objectif de développer un capteur fiable, facilement exploitable et combinant les avantages des systèmes de mesures satellites et des échantillonnages à forte fréquence, tout en restant à un coût abordable est donc atteint.

Nous avons présenter ici les caractéristiques techniques principales du système SnoDEC, mais son utilisation requiert un traitement des données important. Ainsi, les prochains chapitres traiterons des différentes étapes de la chaîne de traitement permettant d'obtenir une cartographie des surfaces enneigées, à partir de simples images photographiques. Compte tenu de la quantité de données à traiter, ces opérations devront se faire de manière automatique.

Nous allons donc aborder les problématiques suivantes que présente la chaîne de traitement :

- Transformation des images 2D vers une représentation 3D*
- Détection automatique de la neige sur les images*
- Analyse des cartographies obtenues*

Chapitre 6:

De l'image 2D à la cartographie 3D : *Implémentation de l'environnement 3D*

Sommaire du Chapitre:

6.1 Principe de passage de l'image à la représentation 3D :	155
6.1.1 Problématique :	155
6.1.2 Détermination d'un point de vue dans l'espace :	155
6.2 Création de la Matrice des Transformations Géométriques :	156
6.2.1 Paramètres intrinsèques :	156
6.2.2 Les paramètres Extrinsèques de la MTG :	159
6.2.3 Ecriture de la MTG :	161
6.3 Calcul de la Matrice des Transformations Géométriques :	163
6.3.1 Création d'une MTG à partir des coordonnées terrain :	163
6.3.2 Calcul de la MTG par correspondance entre Image et Terrain :	163
6.3.3 Résolution du système d'équations et détermination de la MTG :	164
6.3.4 Choix d'une méthode d'inversion mathématique de la MTG :	166
6.4 Calibration d'un site de mesure et interface utilisateur :	167
6.4.1 Nécessité d'une calibration manuelle des sites de mesures :	167
6.4.2 Interface utilisateur de calage :	168
6.4.3 Exemples de calages :	170
6.5 Calcul des faces cachées et mise en 3D de l'image :	173
6.5.1 Algorithme de calcul des faces cachées :	173
6.5.2 Calcul des faces cachées sur les sites du Vorz :	175

Introduction du Chapitre 6 :

L'un des challenges techniques à résoudre pour que le système SnoDEC soit efficace est la maîtrise des transformations 2D/3D. En effet, lorsque l'appareil photographique acquiert les images sur le bassin versant, celles-ci sont acquises avec leur propre résolution dans un système 2D. Lorsque l'on regarde les photographies, outre le fait qu'elles ne sont pas positionnées dans l'espace réel, les effets de distance implique que les pixels ne représentent pas tous la même surface dans la réalité. Par exemple, un pixel du premier plan peut représenter quelques millimètres, contre un pixel de l'arrière plan qui correspondra à plusieurs mètres sur le terrain.

Il est donc nécessaire de transformer ces images en 2 dimensions, de manière à pouvoir replacer les différents pixels de l'image sur une grille MNT et cartographier la scène. L'objectif de ce chapitre est donc de présenter les méthodes mathématiques qui nous ont permis de transformer, à l'aide d'un MNT du bassin versant, des images en 2 dimensions en cartographies en 3 dimensions.

Pour effectuer ces transformations, la première étape est de passer les données du référentiel image (en 2D) au monde réel (en 3D), à l'aide de plusieurs transformations géométriques dans l'espace. Lorsque ces transformations entre systèmes de coordonnées sont déterminées, il est possible de construire une matrice de passage qui permettra de réaliser automatiquement cette transformation pour l'ensemble de la base de donnée.

Nous verrons donc dans ce chapitre quelles techniques et méthodes mathématiques permettent de passer de nos images 2D à une cartographie en 3 dimensions. Cette procédure nécessite de passer par une phase de calibration pour laquelle nous avons implémenté un utilitaire (plateforme Java) simplifiant considérablement cette étape. Enfin, lorsque le calage est effectué, on peut passer à la détermination des surfaces cachées, qui donne une cartographie des zones visibles du bassin versant sur nos images.

CHAPITRE 6. DE L'IMAGE 2D À LA CARTOGRAPHIE 3D : IMPLÉMENTATION DE L'ENVIRONNEMENT 3D

Section 6.1

Principe de passage de l'image à la représentation 3D :

6.1.1 Problématique :

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, l'ensemble des données nivologiques nous parvient sous forme de photographies, et donc de données 2D. Pour en réaliser la cartographie la plus précise et la plus informative possible, il est nécessaire de transformer ces données, en trouvant la transformation géométrique permettant de passer des données 2D aux données 3D. Cette transformation, passe par un Modèle Numérique de Terrain (MNT), et la réalisation d'une calibration entre deux images par détection manuelle de points analogues. Un des objectifs est de permettre la visualisation en "pseudo 3D" de scènes, à partir d'un Modèle Numériques de Terrain et d'un point de vue choisi par l'utilisateur. Pour cela, on utilisera les paramètres de projection définis initialement (angles, position,...), par calibration par exemple, pour créer une Matrice des Transformations Géométriques adaptée, et l'appliquer aux différents points du MNT. On obtiendra en sortie une image simulant la scène MNT depuis un point défini.

Au final, pour chaque image, la transformation géométrique a été calculée, et la cartographie de l'ensemble des pixels image sera réalisée sur une représentation 3D du bassin versant. Cependant, la contrainte de temps sera cruciale, puisque cette opération devra se faire sur des milliers d'images. Ainsi, il est innavigable de devoir réaliser une intervention manuelle sur chaque image, celle-ci devra être globale. De plus, le temps de calcul devra être limité, afin de permettre le traitement en série d'un grand nombre d'images.

6.1.2 Détermination d'un point de vue dans l'espace :

L'intérêt premier de la simulation que nous proposons de mettre en oeuvre, est de permettre, à partir du MNT d'un terrain quelconque de simuler le résultat d'une prise de vue, notamment en termes de déformations liées aux perspectives spatiales, et aux altitudes des zones du MNT étudié. Avant même de présenter les principes de la transformation géométrique 3D, nous nous devons de rappeler les mécanismes permettant de repérer un point dans l'espace. Pour cela, on va définir un point de prise de vue, ainsi que des angles permettant de calculer l'orientation de la visée dans l'espace. Pour définir une ligne de visée ou de prise de vue dans l'espace, on a besoin de 3 angles (*cf figure 6.1*).

La définition de ces 3 angles de repérage dans l'espace ne permet pas à elle seule de réaliser la virtualisation d'un MNT. En effet, pour le caler, on a également besoin de la position de la caméra, ainsi que des paramètres spécifiques à l'appareil photographique simulé (focale, distorsion...). L'ensemble de ces paramètres est regroupé mathématiquement dans une matrice générale : la **Matrice de Transformation Géométrique**.

6.2. CRÉATION DE LA LA MATRICE DES TRANSFORMATIONS GÉOMÉTRIQUES :

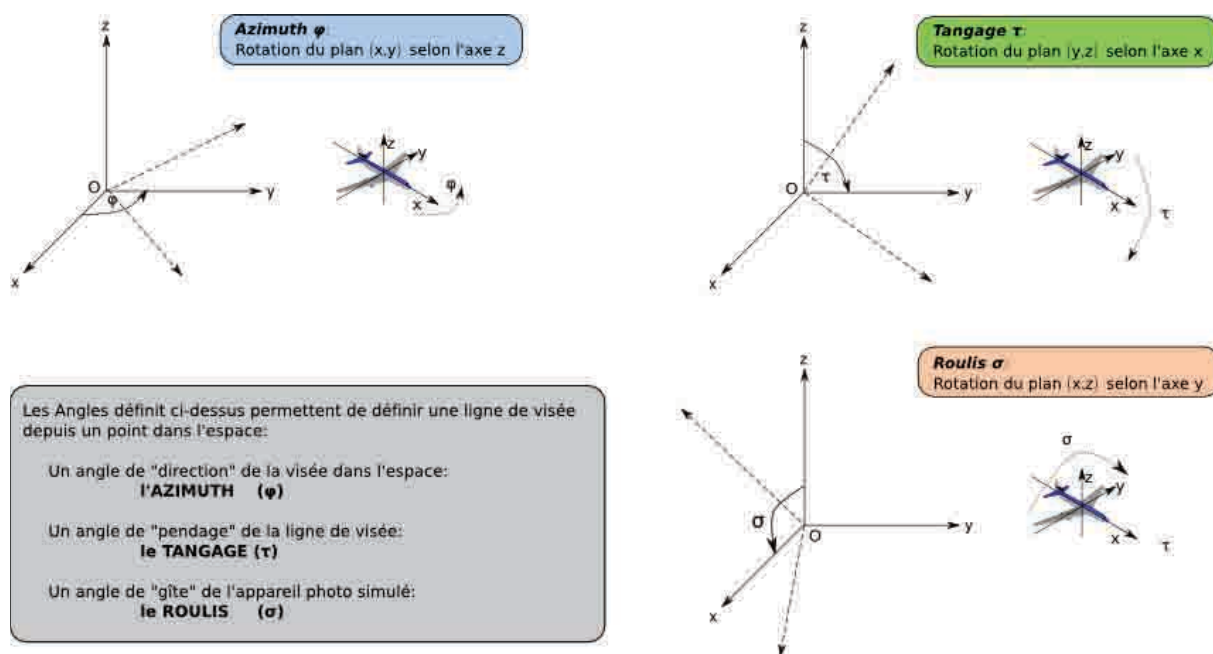


FIG. 6.1: Principe de détermination d'un angle dans l'espace

Section 6.2

Création de la la Matrice des Transformations Géométriques :

La Matrice de Transformation Géométrique permet de passer des coordonnées « *Monde* » aux coordonnées de l'objet dans le repère de la caméra, et enfin, de transformer ces coordonnées à 3 dimensions en coordonnées à 2 dimensions : « *Coordonnées Image* ». Pour effectuer cette transformation, la MTG utilise plusieurs types de paramètres :

1. **Les Paramètres Intrinsèques** : Relatifs aux caractéristiques de l'appareil de prise de vue. On y détermine notamment la focale, ainsi que les coefficients de distorsion de l'image liés aux imperfections des lentilles de l'appareil par exemple. C'est également à cette étape que l'on détermine les caractéristiques finales de l'image.
2. **Les Paramètres Extrinsèques** : Ils permettent de lier entre elles les coordonnées de l'objet dans le repère "*Caméra*" et le repère "*monde*". C'est dans cette étape que l'on déterminera les angles de visée de l'appareil, ainsi que sa position par rapport à la scène.

6.2.1 Paramètres intrinsèques :

Les paramètres Intrinsèques de la MTG correspondent aux transformations nécessaires pour passer des coordonnées de l'objet étudié dans le repère de la prise de vue (appareil photo, caméra), à ses coordonnées dans le repère "Image" final. Dans tout le raisonnement qui suit, on travaillera avec des coordonnées homogènes, afin de réaliser plus commodément les opérations matricielles dans les dimensions adéquates. En réalité, la plupart des paramètres intrinsèques sont liés aux caractéristiques de l'appareil de prise de vue, et sont généralement accessible

CHAPITRE 6. DE L'IMAGE 2D À LA CARTOGRAPHIE 3D : IMPLÉMENTATION DE L'ENVIRONNEMENT 3D

d'après la notice technique accompagnant celui-ci. Ainsi, dans un premier temps, on établira la relation de projection en perspective des points (en coordonnées caméra) dans le repère image final, puis, on modifiera cette relation en fonction des paramètres de l'appareil de prise de vue. Enfin, on établira la relation finale de transformation des points 3D à des points 2D en perspective.

6.2.1.1 Projection en perspective :

La projection en perspective permet de donner un caractère volumique à une image 2D. Pour réaliser cette transformation, on exprime les coordonnées dans l'image en fonction des coordonnées dans l'espace en utilisant les relations suivantes définies à partir de la figure 6.2.

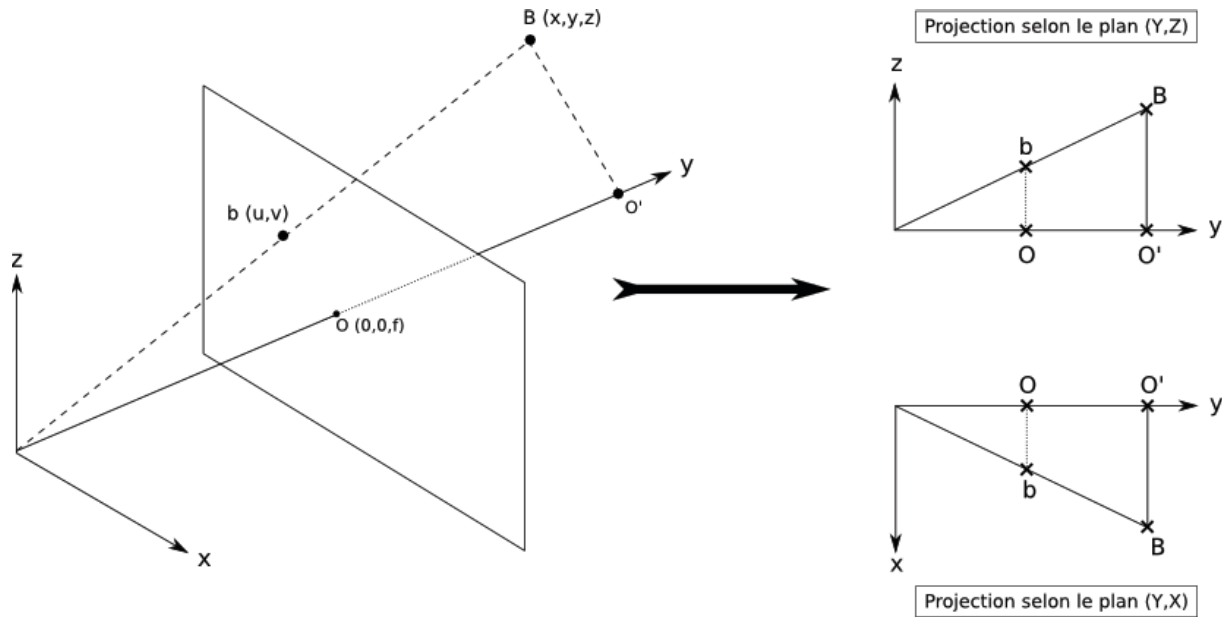


FIG. 6.2: Correspondance entre coordonnées *Caméra* et coordonnées *Image*

A partir des figures précédentes, on peut définir les relations suivantes :

Selon le plan (X,Y) :

$$\begin{aligned}
 X_b &\Rightarrow \frac{FO}{FO'} = \frac{Fb}{FB} \\
 &\Leftrightarrow \frac{f}{Y} = \frac{X_b}{X_B} \\
 I_b &= f \cdot \frac{X_B}{Y}
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Selon le plan (Z,Y) :

$$\begin{aligned}
 Z_b &\Rightarrow \frac{FO}{FO'} = \frac{Fb}{FB} \\
 &\Leftrightarrow \frac{f}{Y} = \frac{Z_b}{Z_B} \\
 J_b &= f \cdot \frac{Z_B}{Y}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

6.2. CRÉATION DE LA LA MATRICE DES TRANSFORMATIONS GÉOMÉTRIQUES :

Ces relations peuvent s'écrire sous forme matricielle :

$$\begin{cases} x'_C = f \cdot \frac{x_C}{z_C} \\ y'_C = f \cdot \frac{y_C}{z_C} \\ z'_C = f \end{cases} \iff \begin{pmatrix} s \cdot x'_C \\ s \cdot y'_C \\ s \cdot z'_C \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

6.2.1.2 Prise en compte des caractéristiques du capteur image

Maintenant que l'on a établi une relation entre les coordonnées du repère caméra et les coordonnées du repère image, il est également nécessaire d'établir une relation reliant les centres des deux repères : le centre optique O et le centre de projection O' (centre de l'image finale). Cette relation permettra ainsi de replacer, l'ensemble des coordonnées des points calculés par rapport au centre de projection, dans l'image finale.

Trouver les coordonnées pixels des points du repère caméra correspond en réalité à écrire, à partir des relation précédentes, la manière dont la position du centre de l'image, et les caractéristiques du capteur agissent sur la position des points. On va alors prendre en compte un facteur d'échelle reflétant le nombre et la taille des sites photosensibles du capteur que l'on appellera k (en pixel/mm). De plus, on va fixer les coordonnées du centre optique par rapport au centre de l'image, et calculer en fonction de celui-ci les nouvelles coordonnées des points dans l'image. Par commodité, on considère souvent que I_0 et J_0 correspondent au centre de l'image.

$$\begin{cases} i = I_0 + k_i \cdot x'_C \\ j = I_0 + k_j \cdot y'_C \end{cases} \quad (6.4)$$

La relation entre les coordonnées images (x', y', z') et les coordonnées pixel (i, j) s'écrit donc :

$$\begin{pmatrix} i \\ j \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_i & 0 & 0 & I_0 \\ 0 & k_j & 0 & J_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x'_C \\ y'_C \\ z'_C \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

6.2.1.3 Construction de la matrice des Paramètres Intrinsèques

Comme on l'a vu, la transformation de l'image en fonction des paramètres intrinsèques se fait en deux étapes :

1. Une projection en perspective des points du monde réel dans l'image finale
2. La prise en compte des caractéristiques du capteur image

Pour chacune de ces étapes, on a écrit une matrice de transformation. La matrice des paramètres intrinsèques correspond donc à l'application successive de ces deux matrices sur les points composant le monde réel. On peut alors écrire :

$$\begin{pmatrix} k_i & 0 & 0 & I_0 \\ 0 & k_j & 0 & J_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_i & 0 & \frac{I_0}{f} & 0 \\ 0 & k_j & \frac{J_0}{f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

On pose :

$$\begin{cases} \alpha_i = k_i \cdot f \\ \alpha_j = k_j \cdot f \end{cases} \quad (6.7)$$

CHAPITRE 6. DE L'IMAGE 2D À LA CARTOGRAPHIE 3D : IMPLÉMENTATION DE L'ENVIRONNEMENT 3D

La matrice des paramètres Intrinsèques s'écrit donc :

$$\mathcal{I} = \begin{pmatrix} \alpha_i & 0 & I_0 & 0 \\ 0 & \alpha_j & J_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

6.2.1.4 Relation entre coordonnées images et coordonnées caméra :

La matrice \mathcal{I} écrite ci-dessus permet de définir un ensemble d'équations reliant entre elles les coordonnées image et les coordonnées caméra. En terme mathématiques, on a :

$$\begin{pmatrix} s \cdot j \\ s \cdot i \\ s \end{pmatrix} = \mathcal{I} \cdot \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.9)$$

On en déduit le système d'équations reliant les coordonnées Images et Caméra :

$$\begin{cases} i = k_i \cdot f \cdot X_C + I_0 \\ j = k_j \cdot f \cdot Y_C + J_0 \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{avec } \alpha_i = k_i \cdot f \\ \text{avec } \alpha_j = k_j \cdot f \end{matrix} \quad (6.10)$$

Ce qui en forme matricielle donne :

$$\begin{pmatrix} i \\ j \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_i & 0 & I_0 \\ 0 & \alpha_j & J_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.11)$$

A partir des équations décrites précédemment, on peut donc définir la matrice des paramètres intrinsèques, c'est-à-dire la matrice permettant le passage des coordonnées liées au repère *Caméra* (prise de vue) aux des coordonnées *Images* (photo 2D) correspondantes. Cependant, il est maintenant nécessaire de définir comment on passe des coordonnées réelles du repères *monde*, aux coordonnées *Caméra*.

6.2.2 Les paramètres Extrinsèques de la MTG :

Les paramètres extrinsèques permettent de lier entre elles les coordonnées du repère *monde* (coordonnées géographiques,...) et les coordonnées du repère *caméra* (position de la scène dans le repère caméra). L'objectif de la détermination des paramètres extrinsèques est donc de définir une relation permettant de passer d'un système à l'autre. En réalité, ce changement correspond à une triple rotation du repère initial (selon les axes X,Y et Z), et une translation de l'origine du système monde vers l'origine du système de la prise de vue.

6.2.2.1 Détermination des matrices de rotation :

Afin d'écrire la matrice de transformation, on va écrire les matrices de rotations et de transformations permettant la liaison des deux systèmes de coordonnées. Comme on l'a vu dans les premiers paragraphes, les rotations dans l'espace sont définies par trois angles. On écrira donc trois matrices spécifiques pour exprimer la rotation selon chacun des axes.

6.2. CRÉATION DE LA LA MATRICE DES TRANSFORMATIONS GÉOMÉTRIQUES :

a) Rotation selon l'axe X :

La rotation de l'axe X se fait par l'intermédiaire de l'angle τ , selon le plan (Y,Z). On obtient donc en coordonnées homogènes :

$$RotX = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\tau) & \sin(\tau) & 0 \\ 0 & -\sin(\tau) & \cos(\tau) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.12)$$

b) Rotation selon l'axe Y :

La rotation de l'axe Y se fait par l'intermédiaire de l'angle σ , selon le plan (X,Z) . On obtient donc en coordonnées homogènes :

$$RotY = \begin{pmatrix} \cos(\sigma) & 0 & \sin(\sigma) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\sigma) & 0 & \cos(\sigma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.13)$$

c) Rotation selon l'axe Z :

La rotation de l'axe Z se fait par l'intermédiaire de l'angle ϕ , selon le plan (X,Y) . On obtient donc en coordonnées homogènes :

$$RotZ = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 & 0 \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.14)$$

La matrice de rotation 3D associée à ces transformations est donc le résultat du produit des trois matrices précédentes :

$$\mathcal{R} = R_X \cdot R_Y \cdot R_Z \quad (6.15)$$

On a donc :

$$\begin{aligned} \mathcal{R} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\tau & \sin\tau & 0 \\ 0 & -\sin\tau & \cos\tau & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\sigma & 0 & \sin\sigma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\sigma & 0 & \cos\sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \mathcal{R} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\tau & \sin\tau & 0 \\ 0 & -\sin\tau & \cos\tau & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\sigma \cdot \cos\phi & \cos\sigma \cdot \sin\phi & \sin\sigma & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 & 0 \\ -\sin\sigma \cdot \cos\phi & -\sin\sigma \cdot \sin\phi & \cos\sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \mathcal{R} &= \begin{pmatrix} \cos\sigma \cdot \cos\phi & \cos\sigma \cdot \sin\phi & \sin\sigma & 0 \\ -\sin\phi \cdot \cos\tau - \sin\sigma \cdot \cos\phi \cdot \sin\tau & \cos\phi \cdot \cos\tau - \sin\sigma \cdot \sin\phi \cdot \sin\tau & \cos\sigma \cdot \sin\tau & 0 \\ \sin\phi \cdot \sin\tau - \sin\sigma \cdot \cos\phi \cdot \cos\tau & -\cos\phi \cdot \sin\tau - \sin\sigma \cdot \sin\phi \cdot \cos\tau & \cos\sigma \cdot \cos\tau & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.16) \end{aligned}$$

CHAPITRE 6. DE L'IMAGE 2D À LA CARTOGRAPHIE 3D : IMPLÉMENTATION DE L'ENVIRONNEMENT 3D

Au final, on retiendra que la matrice de rotation autour des trois axes X,Y et Z est de la forme :

$$\mathcal{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.17)$$

6.2.2.2 Détermination de la matrice de translation :

La dernière étape de la création de la matrice de passage des coordonnées *monde* aux coordonnées liées au *repère caméra*, est la migration de l'origine du repère monde vers celui de repère caméra. Pour cela, on va écrire une matrice de translation.

a) Matrice de translation :

La matrice de transformation se calcule en fonction des différences entre, les coordonnées d'origine du repère caméra dans le système final, et ses coordonnées dans le monde réel. On obtient alors :

$$\mathcal{T} = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.18)$$

6.2.2.3 Ecriture de la matrice des paramètres extrinsèques :

Maintenant que l'on a déterminé les matrices de rotation et de translation, on va pouvoir écrire la matrice des paramètres extrinsèques. En effet, cette matrice est en réalité le résultat d'une triple rotation et d'une translation de l'origine du repère monde. Soit (X,Y,Z) les coordonnées dans le repère caméra et (X',Y',Z') celles du repère monde, alors on a :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.19)$$

D'après cette équation générale, on peut écrire sous forme matricielle unique la matrice des paramètres extrinsèques :

$$\mathcal{E} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_X \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_Y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.20)$$

6.2.3 Ecriture de la MTG :

La Matrice de Transformation Géométrique est composée de deux matrices distinctes, que l'on a explicité. Il s'agit maintenant d'écrire la MTG finale.

$$\mathcal{M} = \mathcal{I} \cdot \mathcal{E}$$

6.2. CRÉATION DE LA LA MATRICE DES TRANSFORMATIONS GÉOMÉTRIQUES :

$$\mathcal{M} = \begin{pmatrix} \alpha_i & 0 & I_0 & 0 \\ 0 & \alpha_j & J_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_X \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_Z \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_Y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.21)$$

A partir des équations précédentes, on peut écrire une MTG unique, (\mathcal{M}) permettant de passer d'un triplet de *points terrain* à un doublet de *points image*, ce qui revient à poser le système :

$$\begin{pmatrix} s \cdot i \\ s \cdot j \\ s \end{pmatrix} = \mathcal{M} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Z \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.22)$$

Avec une matrice \mathcal{M} de la forme :

$$\mathcal{M} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{pmatrix} \quad (6.23)$$

En réalisant le calcul de l'équation 6.21, on peut définir les coefficients de la MTG, à partir des paramètres connus (angles de position dans l'espace de l'appareil photo, focale de l'appareil, caractéristiques du capteur CCD,...), on obtient :

$$\mathcal{M} = \begin{pmatrix} \alpha_i \cdot r_{11} + I_0 \cdot r_{31} & \alpha_i \cdot r_{12} + I_0 \cdot r_{32} & \alpha_i \cdot r_{13} + I_0 \cdot r_{33} & \alpha_i \cdot T_X + I_0 \cdot T_Y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_Y \\ \alpha_j \cdot r_{21} + J_0 \cdot r_{31} & \alpha_j \cdot r_{22} + J_0 \cdot r_{32} & \alpha_j \cdot r_{23} + J_0 \cdot r_{33} & \alpha_j \cdot T_X + J_0 \cdot T_Y \end{pmatrix} \quad (6.24)$$

A partir de cette matrice, il est possible, en connaissant les caractéristiques de base de l'appareil de prise de vue, sa position et sa direction de visée, de déterminer les coordonnées *image* d'un point quelconque du terrain apparaissant sur la prise de vue.

CHAPITRE 6. DE L'IMAGE 2D À LA CARTOGRAPHIE 3D : IMPLÉMENTATION DE L'ENVIRONNEMENT 3D

Section 6.3

Calcul de la Matrice des Transformations Géométriques :

A partir de la forme théorique de la matrice des Transformations Géométriques que nous venons d'exposer, on va maintenant voir comment il est possible de la calculer numériquement. Deux méthodes principales ont été utilisées :

- Calcul de la MTG pour des paramètres de prise de vue donnés
- Calcul de la MTG à partir de doublets de correspondances *terrain-image*

6.3.1 Création d'une MTG à partir des coordonnées terrain :

Nous nous plaçons ici dans le cas où l'on dispose des coordonnées X, Y, Z d'une scène et que l'on souhaite connaître les coordonnées image de cette scène, sans toutefois connaître la Matrice de Transformation Géométrique. En réalité, cette opération conduit à simuler le comportement d'un appareil de prise de vue. Pour cela, on va dans un premier temps fixer les paramètres extrinsèques et intrinsèques, puis calculer la MTG correspondante. On aura donc les données suivantes pour la constitution de la MTG :

- La position X, Y, Z de l'appareil de prise de vue
- Les angles de visée τ, σ, ϕ
- La focale de l'appareil
- le facteur d'échelle qui sera de 1 par défaut (pas de déformation)
- Les coordonnées I_0 et J_0 de premier pixel image (0 par défaut)

Ainsi, en remplaçant dans l'équation 6.24 les paramètres par les valeurs explicitées ci-dessus, on obtient une MTG permettant de passer des coordonnées terrain aux coordonnées images. Cette nouvelle image correspond à une image virtuelle de la scène au niveau d'une prise de vue (cf figure 6.3).

6.3.2 Calcul de la MTG par correspondance entre Image et Terrain :

Dans cette situation, on cherche à passer de points topographiques (X, Y, Z) aux pixels image (I, J) , ou l'inverse. En d'autres termes, on recherche la transformation mathématique (MTG) permettant de passer de l'image au terrain ou du terrain à l'image. Pour cela, on va résoudre l'équation 6.22 :

$$\begin{pmatrix} s \cdot i \\ s \cdot j \\ s \end{pmatrix} = \mathcal{M} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.25)$$

Cela revient à résoudre le système :

$$\begin{cases} s \cdot i &= m_{11}X + m_{12}Y + m_{13}Z + m_{14} \\ s \cdot j &= m_{21}X + m_{22}Y + m_{23}Z + m_{24} \\ s &= m_{31}X + m_{32}Y + m_{33}Z + m_{34} \end{cases} \quad (6.26)$$

6.3. CALCUL DE LA MATRICE DES TRANSFORMATIONS GÉOMÉTRIQUES :

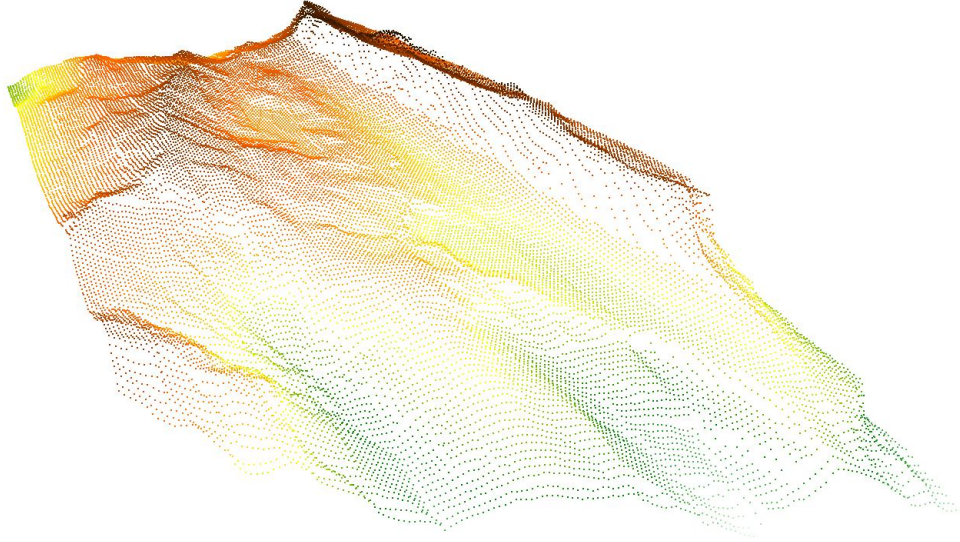


FIG. 6.3: Simulation de la prise de vue d'un MNT à partir d'une MTG définie

Ce système peut également s'exprimer de cette manière, en cherchant à déterminer les paramètres m :

$$\begin{cases} i = \frac{m_{11}X + m_{12}Y + m_{13}Z + m_{14}}{m_{31}X + m_{32}Y + m_{33}Z + m_{34}} \\ j = \frac{m_{21}X + m_{22}Y + m_{23}Z + m_{24}}{m_{31}X + m_{32}Y + m_{33}Z + m_{34}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} i \cdot m_{34} = m_{11}X - i \cdot m_{31}X + m_{12}Y - i \cdot m_{32}Y + m_{13}Z - i \cdot m_{33}Z + m_{14} \\ j \cdot m_{34} = m_{21}X - j \cdot m_{31}X + m_{22}Y - j \cdot m_{32}Y + m_{23}Z - j \cdot m_{33}Z + m_{24} \end{cases} \quad (6.27)$$

Cette équation permet de mettre en relation les points terrain et image. Ainsi, pour un point terrain X, Y, Z donnée, on a un point image I, J . Cependant, on dispose ici de deux équations pour les 12 inconnues de la MTG, le système est donc sous-dimensionné. De plus, le paramètre m_{34} gêne la résolution de ce système.

6.3.3 Résolution du système d'équations et détermination de la MTG :

Pour remédier au problème du paramètre m_{34} du sous-dimensionnement, on va, comme proposé dans [Horaud et Monga, 1999](#) ([61]), poser la contrainte $m_{34} = 1$ et écrire le système

CHAPITRE 6. DE L'IMAGE 2D À LA CARTOGRAPHIE 3D : IMPLÉMENTATION DE L'ENVIRONNEMENT 3D

sous forme matricielle. On obtient alors :

$$\begin{pmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -iX & -iY & -iZ \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -jX & -jY & -jZ \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \\ m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ i \cdot m_{34} \\ j \cdot m_{34} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (6.28)$$

6.3.3.1 Utilisation de la contrainte $m_{34} = 1$:

En posant $m_{34} = 1$, on obtient un système de 11 paramètres inconnus à déterminer, et dont les solutions sont les coefficients de la matrice de transformation géométrique, au facteur de translation Z près ($m_{34} = T_Z$ dans la MTG). Pour résoudre un tel système, on a besoin d'autant d'équations que d'inconnues, soit un minimum de 11 équations.

En réalité, pour chaque point de référence X, Y, Z du terrain, on va rechercher ses coordonnées I, J sur l'image, et obtenir un système de deux équations. À partir de la correspondance image-terrain d'un point, on obtient donc deux équations. Mathématiquement, on a donc besoin de 6 points pour écrire les 11 équations et résoudre le système. Cependant, plus on a de points de référence, plus l'estimation de la MTG sera précise.

6.3.3.2 Résolution de système d'équations linéaires surdéterminées :

Comme on l'a vu, un nombre conséquent de points de référence permet de mieux définir la matrice de transformation géométrique, et conduit à la résolution d'un système d'équations linéaires surdéterminé.

Le problème revient donc à résoudre l'équation suivante : $A \cdot x = B$,

puis, trouver les solutions x qui minimisent au mieux le terme de résidu : $r = A \cdot x - B$.

On peut montrer que la résolution de ce système revient à résoudre le problème initial aux moindres carrés, ce qui en terme matricielle s'écrit :

$$\begin{aligned} A \cdot x &= B \\ A^T A \cdot x &= A^T B \end{aligned} \quad (6.29)$$

Avec :

- A : La matrice des coefficients constants du système (X_n, Y_n, Z_n, I_n, J_n)
- A^T la transposée de la matrice A
- x : La matrice des inconnus du système, c'est-à-dire les coefficients de la MTG
- B : La matrice des résultats (I_n, J_n) qui correspond aux coordonnées I, J de référence

L'écriture du système initial sous cette forme permet de le rendre carré, et rend ainsi possible sa résolution. La résolution numérique d'un tel système se fera alors par une méthode du pivot (Jordan-Gauss) ou, dans notre cas, une décomposition LU. On posera alors :

$$\begin{aligned} A^T A &= LU \\ \text{donc : } LU \cdot x &= A^T B \end{aligned} \quad (6.30)$$

6.3. CALCUL DE LA MATRICE DES TRANSFORMATIONS GÉOMÉTRIQUES :

La décomposition LU de la matrice $A^T A$ permet de résoudre le système de la manière suivante :

$$\begin{aligned} L(U \cdot x) &= A^T B & \text{avec : } U \cdot x &= y \\ L \cdot y &= A^T B \\ U \cdot x &= y \end{aligned} \quad (6.31)$$

Ainsi, pour trouver la MTG permettant de passer des coordonnées *terrain* aux coordonnées *monde*, il est nécessaire de disposer d'un minimum de 6 points de référence pour effectuer le calcul théorique mathématique. Dans la pratique, lorsque l'on maximise le nombre de points, on minimise l'erreur sur la détermination des coefficients de la MTG.

6.3.4 Choix d'une méthode d'inversion mathématique de la MTG :

Comme on vient de le montrer, la résolution du système matriciel de détermination de la MTG passe par une inversion de cette MTG. De fait, la précision de la méthode mathématique utilisée pour la réaliser est primordiale dans la définition de la MTG. En effet, puisque l'on travaille sur un faible nombre de points, compte tenu de la taille du MNT à caler, de petites erreurs sur ceux-ci ou dans la définition de la MTG associée peuvent entraîner des erreurs extrêmement importantes pour des points situés dans les parties externes de l'image, ou encore à grande distance de l'appareil. Lors de notre étude, nous avons travaillé avec les méthodes d'inversions suivantes :

- La méthode du Pivot de Gauss-Jordan
- La décomposition LU

Lors de la mise en place de l'algorithme d'inversion de la MTG, puis, lors des phases de calage des modélisations 3D, il a été mis en évidence une dérive et une inadéquation de la méthode du pivot. Ainsi, lors du reste du travail, c'est la méthode de la décomposition LU qui a été utilisée. En outre, à moyen terme, il est prévu de renforcer cette méthode d'inversion, afin d'obtenir des résultats plus robustes. En effet, comme nous travaillons sur des valeurs extrêmement faibles lors de l'inversion, des effets de dérives sont observés au alentour de 0. L'utilisation de la méthode de régularisation de Tychonoff ou de décomposition en valeurs singulières, permettrait vraisemblablement d'obtenir de meilleurs résultats.

CHAPITRE 6. DE L'IMAGE 2D À LA CARTOGRAPHIE 3D : IMPLÉMENTATION DE L'ENVIRONNEMENT 3D

Section 6.4

Calibration d'un site de mesure et interface utilisateur :

Les paragraphes précédents nous ont permis de mettre en place les équations mathématiques permettant de passer d'une image en 2 dimensions à sa transformation dans un monde en 3 dimensions. Dans cette partie, nous allons nous focaliser sur l'application de cette technique et sa mise en oeuvre sur nos images du Vorz.

6.4.1 Nécessité d'une calibration manuelle des sites de mesures :

Comme nous l'avons présenté précédemment, il existe deux manières de réaliser une matrice des transformations géométriques, permettant de passer d'informations 2D à 3D :

- Détermination de points de correspondances MNT/Image pour calculer la MTG
- Utilisation des paramètres de la caméra permettant l'implémentation de la MTG

Dans notre cas, les deux solutions ont été envisagées et leur faisabilité a été estimée.

En théorie, seul 6 points sont nécessaires, mais, dans la réalité, nous travaillons dans des angles de prises de vue plongeant présentant une profondeur de champ non négligeable dans l'image. Ainsi, une variation des quelques pixels peut entraîner des déplacements très conséquents dans les trois directions de l'espace lors de l'identification des points. En conséquence, afin de limiter au maximum les erreurs dues à la profondeur de champs, nous sommes dans l'obligation d'utiliser une bibliothèque conséquente de couples MNT/image pour avoir une résolution acceptable. De plus, dans la réalité, cette l'identification des couples s'avère particulièrement compliquée, notamment dans l'identification d'un pixel MNT précis sur une grille en 2 dimensions, sans forcément disposer de vue 3D. A la suite de cette étape, les couples de correspondance permettent par inversion matricielle de calculer la MTG. Or, on a en conclusion de la section précédente vu que cette phase était sujette à de forts risques d'erreurs. En conséquence, cette technique présente dans notre cas deux désavantages majeurs, et, nous avons considéré une solution alternative.

L'utilisation de la deuxième technique utilisant les paramètres caméra a alors été étudiée. A première vue, lorsque l'on équipe un site de mesure, on connaît à priori l'ordre de grandeur des paramètres caméra, tels que la position ou les angles d'inclinaison, il n'y a donc pas de raison que l'on ne puisse pas les utiliser pour calculer la MTG, cependant, il était nécessaire déterminer ces angles précisément. Ainsi, la calibration s'effectue ici à partir du MNT et d'angles déterminés par l'utilisateur. On simule alors sur le MNT la prise de vue d'un appareil photographique de la même manière que cela se ferait sur le terrain. L'objectif est alors d'obtenir le même paysage MNT que celui que l'on observe sur le terrain. Pour cela, on superpose à la photographie à caler la vue du MNT. Cette technique fonctionne donc par essais/erreurs et peut être effectuée rapidement par un opérateur indépendant, puisqu'elle ne nécessite pas de travail fastidieux de sélection de points et d'identification dans la grille MNT (format acii). De plus, pour réaliser cette calibration, on se base sur les formes de reliefs telles que les sommets, les cols, les arêtes, les dépressions,... en réalisant un rapprochement entre MNT et image. L'idée sous-jacente à cette opération est en réalité une identification visuelle

6.4. CALIBRATION D'UN SITE DE MESURE ET INTERFACE UTILISATEUR :

de points de contrôle mais sur la grille MNT entière, entraînant une augmentation considérable et rapide du nombre de points de contrôle utilisés comparés à la technique précédente.

Dans notre travail, c'est cette technique que nous avons utilisée. Mais, afin de rendre plus simple la phase de superposition, nous avons développé une interface utilisateur qui permet de réaliser différentes tâches rapidement et confortablement pour l'utilisateur.

6.4.2 Interface utilisateur de calage :

L'interface utilisateur nécessitait un langage de programmation plus évolué et plus puissant que le FORTRAN utilisé au commencement de cette thèse. Ainsi, nous avons décidé, notamment en raison de sa richesse, ses possibilités d'évolutions et de compatibilité, d'utiliser le langage JAVA pour la suite de ce travail. L'ensemble des algorithmes et démarches présentés par la suite seront donc codés dans ce langage.

6.4.2.1 Présentation de l'interface utilisateur :

L'objectif de l'interface est de permettre à l'utilisateur de superposer facilement un MNT vue en 3 dimensions sur une image 2D par essai erreur. L'interface permet donc de charger des images, des MNT, d'étudier leur contenu,... Ensuite, elle permet de changer facilement les paramètres caméra afin de réaliser la meilleure superposition possible. Au final, l'utilisateur récupère les données de calage ainsi que la table de correspondance MNT/Image qui sera utilisée dans la phase suivante.

L'interface se présente sous forme classique, avec une barre des tâches dans un environnement fenêtre. La partie principale contient les affichages d'images en cours (MNT, image), et le bloc annexe permet d'interagir sur la fenêtre en réglant manuellement les paramètres par bouton assistant, tout en saisissant directement la valeur de paramètre souhaitée. Les différents onglets de la barre des tâches permettent de gérer les ouvertures de fichier, leur enregistrement, de lancer les calculs une fois le calage effectué et d'exporter les résultats du calage. On dispose de plus d'un onglet d'affichage rapproché des images et MNT, ainsi que d'un onglet de personnalisation de l'aspect du MNT (points, grille,...), améliorant son rendu, notamment lors de la phase de calibration. L'ensemble de ces dispositifs sont présentés dans la figure (6.4).

En terme de contrainte de temps, la calibration par cette interface ne prend que quelques minutes, puisque après chargement de l'image et du MNT, l'utilisateur règle les paramètres selon ses préférences et une fois le calage réalisé, un simple clic permet d'en obtenir les résultats et de commencer à créer les premières cartes. La création de cet outil a donc considérablement accéléré le processus de traitement et de test.

a) Affichage des informations MNT et Image :

Ces onglets permettent d'afficher dans une fenêtre indépendante l'image et le MNT. On dispose ainsi des informations précises sur l'image en fonction de son positionnement dans celle-ci (X,Y). Pour le MNT, on est capable de récupérer et visualiser les altitudes (cf fig.6.5), tandis que sur l'image on peut déterminer les codes RGB de chaque pixel.

b) Réglages des paramètres MNT :

Le bloc interactif principal de l'interface est constitué par les zones de réglages des paramètres. On distingue ainsi quatre types de paramètres : les angles, la position, l'origine de

CHAPITRE 6. DE L'IMAGE 2D À LA CARTOGRAPHIE 3D : IMPLÉMENTATION DE L'ENVIRONNEMENT 3D

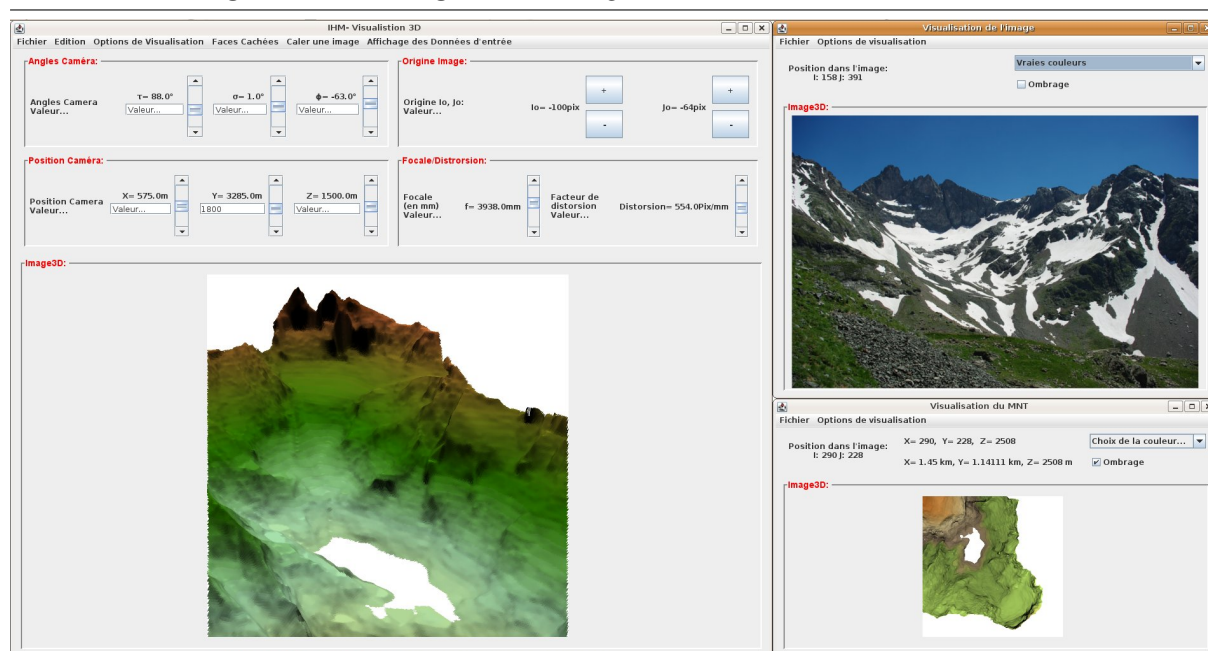


FIG. 6.4: Exemple de fonctionnement de l'interface de calage développée pour le système SnoDEC

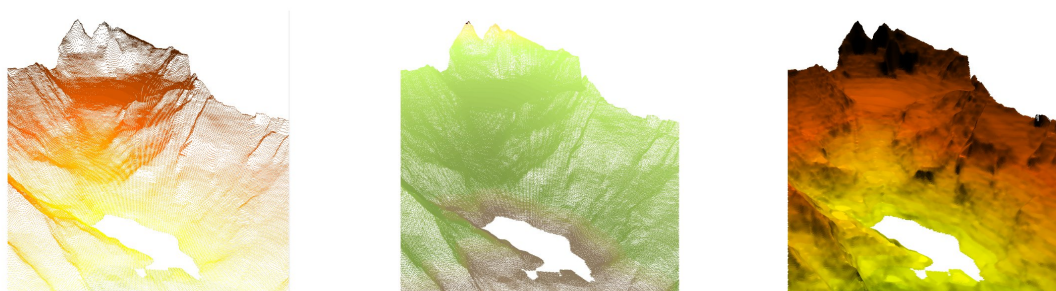


FIG. 6.5: Exemple de rendu des images 3D dans l'interface

l'image, les focales et les distorsions. Ces paramètres peuvent être réglés soit en saisissant directement la valeur, soit par des barres d'intensités, soit par des boutons de réglage (+/-). Ces boutons notamment permettent une navigation plus fluide dans la vue 3D afin de pouvoir mieux "survoler" le bassin versant.

6.4.2.2 Paramètres de calage :

Les types de paramètres sont au nombre de quatre, comme on vient de la dire. Ils correspondent chacun à un paramètre de calcul de la MTG finale, et seront utilisés dans la phase suivante. De plus, ils sont tous indépendants et ajustables à loisir par l'utilisateur.

a) Les angles :

Au nombre de 3, τ , σ et ϕ , il permettent d'incliner et d'orienter la grille MNT suivant les trois directions dans l'espace (cf fig.6.6). L'utilisateur peut ajuster au degré près ces paramètres.

6.4. CALIBRATION D'UN SITE DE MESURE ET INTERFACE UTILISATEUR :

Ils correspondent en réalité à la disposition dans la caméra sur le bassin et à sa ligne de visée dans l'espace.

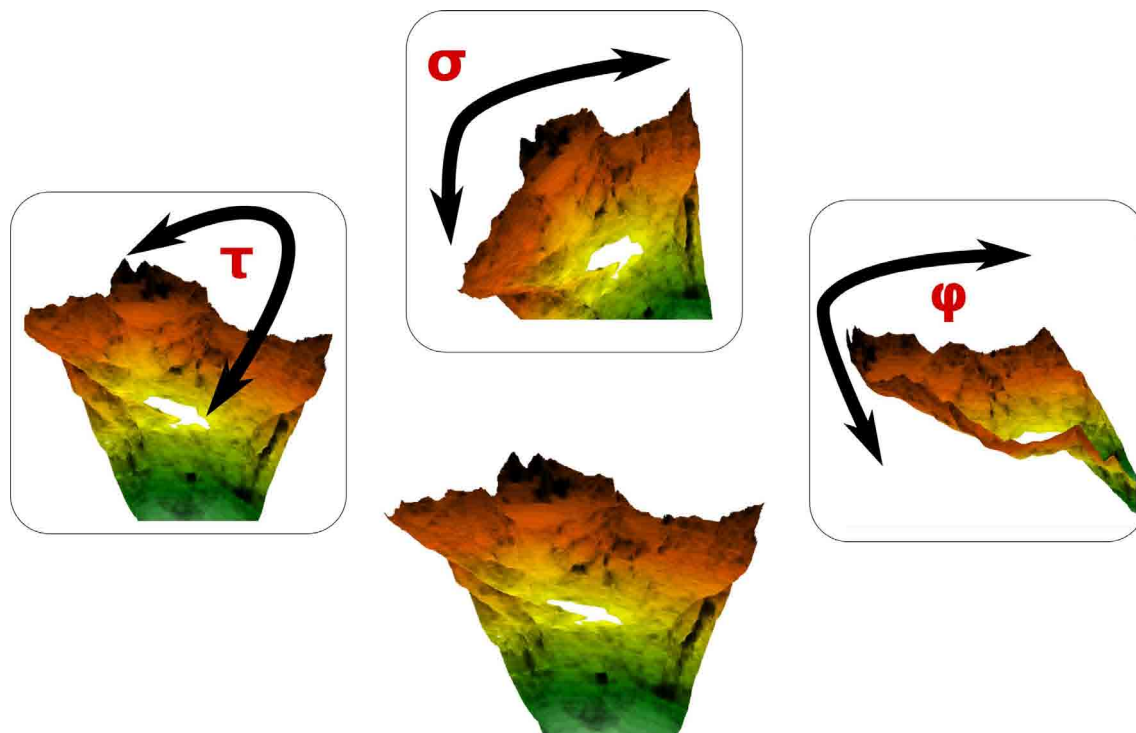


FIG. 6.6: Interactions entre interface et paramètres d'angles

b) La position :

Les paramètres X, Y et Z permettent d'ajuster la position de la caméra dans le bassin au mètre près. Cette étape est relativement aisée, puisque l'on dispose quasiment des coordonnées exactes de la caméra sur le terrain.

c) Origine de l'image et distorsion :

Plus difficiles à appréhender à priori, ces paramètres reflètent les erreurs dans la prise de vue, et les imperfections de l'appareil photographique. On ajuste ainsi la distorsion pouvant se produire sur l'image, ainsi que le décalage du centre optique. La focale quand à elle, même si elle est exprimée en millimètres ne correspond pas à la focale réelle mais à un ensemble de facteurs que l'on a détaillée dans les paragraphes précédents (k notamment).

6.4.3 Exemples de calages :

Durant l'étude, nous avons utilisé l'interface pour réaliser les calages des deux sites de mesures. Les applications concrètes sur le terrain de cette interface sont développées sur chacun des deux sites.

CHAPITRE 6. DE L'IMAGE 2D À LA CARTOGRAPHIE 3D : IMPLÉMENTATION DE L'ENVIRONNEMENT 3D

6.4.3.1 Site du Refuge Jean-Collet :

La figure 6.7 représente le calage réalisé sur la partie médiane du versant du Vorz, au site de mesure du Refuge Jean-Collet. Ces paramètres ont permis de construire les cartes d'enneigement que nous utiliserons par la suite.

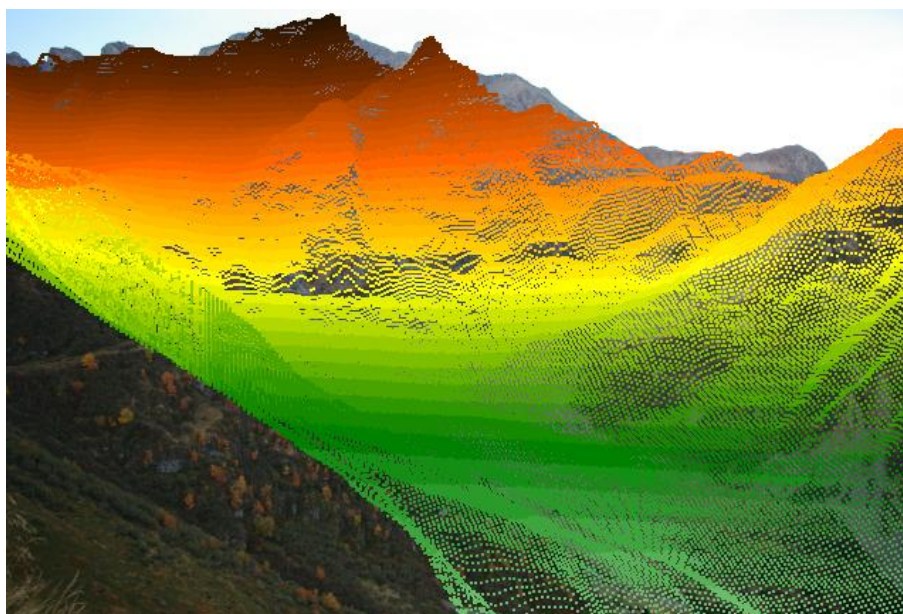


FIG. 6.7: Processus de calage sur le site du Refuge

6.4.3.2 Site du Lac Blanc :

Le Lac Blanc constitue le site référence du système. C'est en effet sur ce site que l'ensemble des tests et mises au point ont été réalisés. Le calage proposé pour ce site est présenté dans la figure 6.8.

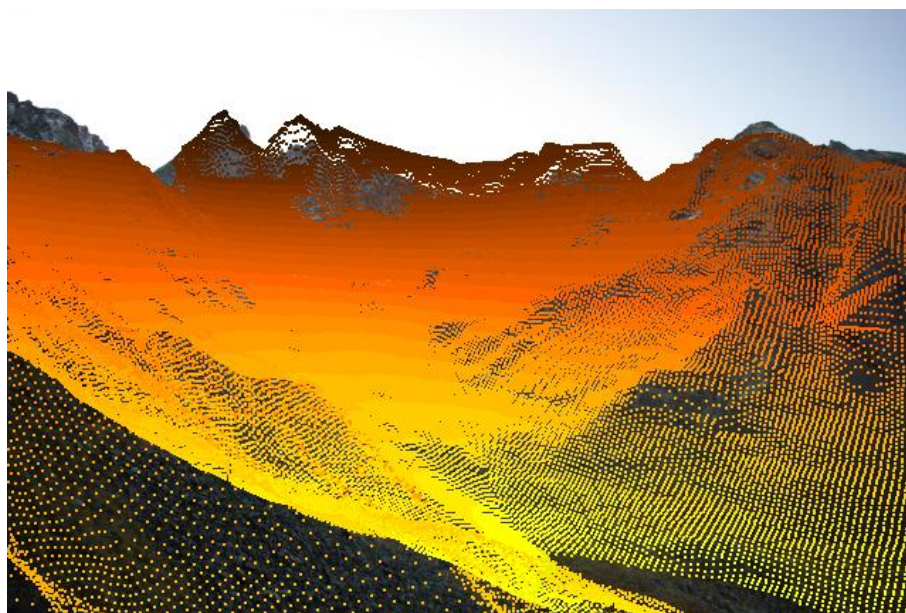


FIG. 6.8: Processus de calage sur le site du Lac Blanc

CHAPITRE 6. DE L'IMAGE 2D À LA CARTOGRAPHIE 3D : IMPLÉMENTATION DE L'ENVIRONNEMENT 3D

Section 6.5

Calcul des faces cachées et mise en 3D de l'image :

6.5.1 Algorithme de calcul des faces cachées :

6.5.1.1 Principes généraux et algorithmes traditionnels :

Lorsque l'on observe la carte du bassin versant, ainsi que le MNT, il est possible de discerner tous les points de l'espace. Cependant, en fonction de sa position sur le bassin versant, l'angle de vue varie et il est possible d'avoir des zones du bassin versant cachées par rapport à notre poste d'observation. Dans notre cas, la caméra orientée vers le Lac Blanc par exemple ne discerne que la partie supérieure du bassin, et, à l'intérieur de cette zone, certaines faces et certains versants sont inobservables car cachés les uns derrière les autres ou orientés de manière opposée. Le calcul des faces cachées permet de déterminer à partir d'un point d'observation quelles sont les points observables sur le bassin. Dans notre cas, le problème se complique encore, puisqu'il s'agit de déterminer les zones que l'appareil est susceptible de discerner et donc cela contraint l'orientation et l'étendue de la vue. Nous appellerons ce calcul la détermination des faces cachées dans toute la suite de ce manuscrit, mais il correspond en fait à la détermination des surfaces visibles par l'appareil photographique.

De nombreux algorithmes de calculs des faces cachées existent dans la littérature. On distingue ainsi les algorithmes des lignes de crêtes, dont le principe est de déterminer pour une distance incrémentale donnée la ligne de crête et les pixels visibles. Ce type d'algorithme repose sur la "technique du peintre" qui consiste à dessiner l'arrière plan de la scène, et de se rapprocher au fur et à mesure de l'appareil en dessinant la ligne de crête de l'incrément de distance associé. Au final, on obtient en écrivant successivement ces couches une mosaïque ou n'apparaissent que les zones visibles (les plus hautes) du paysage.

Les algorithmes de type Z-Order reposent eux sur l'utilisation de la distance et la détection des sommets entre le point d'observation et le pixel. On calcule alors pour une distance donnée si il existe un obstacle entre la cible et l'appareil, susceptible de cacher l'élément en question.

Un algorithme simple mais ne permettant pas le calcul intégral de la scène visible est celui des surfaces orientées. Avec cette technique, on détermine si une face est orientée dans la même direction que la ligne de visée de l'observation. Ainsi si elles possèdent la même orientation, elles ne peuvent pas se voir. On utilise ici le concept de normal et de croisement dans l'espace.

L'ensemble de ces techniques fait appel à des ressources de géométrie dans l'espace et repose essentiellement sur l'objet triangle. En effet, celui-ci ne présentant qu'un seul plan, on peut en déterminer facilement l'orientation (X,Y et Z pour la normale) ; au contraire d'un carré qui peut, dans l'espace, posséder deux orientations différentes, à l'image d'une couverture de livre ouverte par exemple. Ainsi le MNT dont nous disposons sera utilisé par l'intermédiaire de triangles, appelés TIN par abus de langage, puisqu'ils sont en fait obtenus par découpage des pixels MNT en deux triangles.

Les techniques de calculs présentées permettent de réaliser le calcul des faces cachées pour un paysage entier, cependant, dans notre cas, l'appareil ayant une certaine orientation et surtout une focale précise, le champ d'observation est d'autant plus limité. Il conviendra donc

6.5. CALCUL DES FACES CACHÉES ET MISE EN 3D DE L'IMAGE :

de la prendre en compte pour déterminer les faces cachées. Déterminer l'emprise de l'appareil photographique sur le bassin versant n'est pas toujours facile. Cette difficulté associée à celle du calcul des faces cachées nous a conduit à imaginer une méthode plus adaptée à notre cas et reposant sur l'utilisation de l'idée de superposition de l'interface utilisateur précédente. Voici comment nous allons calculer les faces cachées dans notre logiciel.

6.5.1.2 Mise en place d'une technique de calcul alternative :

La technique de détermination des faces cachées que nous avons mise au point repose, sur le protocole présenté précédemment, c'est-à-dire la superposition d'un MNT sur une image. L'idée générale est la suivante : lorsque l'on superpose MNT et image, les pixels images sont situés à l'intérieur ou à l'intersection des pixels MNT. En conséquence, il est possible de déterminer pour une image donnée à quel pixel MNT il correspond, et cela, quel que soit le cas de figure. Au final, en utilisant l'image de calibration, on obtient une liste sur laquelle pour chaque pixel image, les pixels MNT sont associés.

Cette méthode présente un avantage incontestable qui permet de travailler dans tous les cas de figure, que l'on soit à courte ou à longue distance. En effet, à courte distance (premier plan de l'image), l'image est précise et les pixels fournissent une très bonne résolution (nombreux pixels image appartenant à une même pixel MNT). A l'inverse, à grande distance (arrière plan sur les sommets), on a des pixels image dont la taille peut représenter plusieurs mètres sur le terrain, en raison de la résolution de l'appareil photographique, il peut donc y avoir un pixel image qui appartient à plusieurs pixels MNT. Ces problèmes d'échelle sont dus à la résolution de l'appareil photographique qui crée une inhomogénéité des échelles à l'intérieur de la photographie. Cette inhomogénéité est de plus renforcée par les phénomènes de distorsion. L'ensemble de ces phénomènes est résumé dans la figure 6.9 suivante.

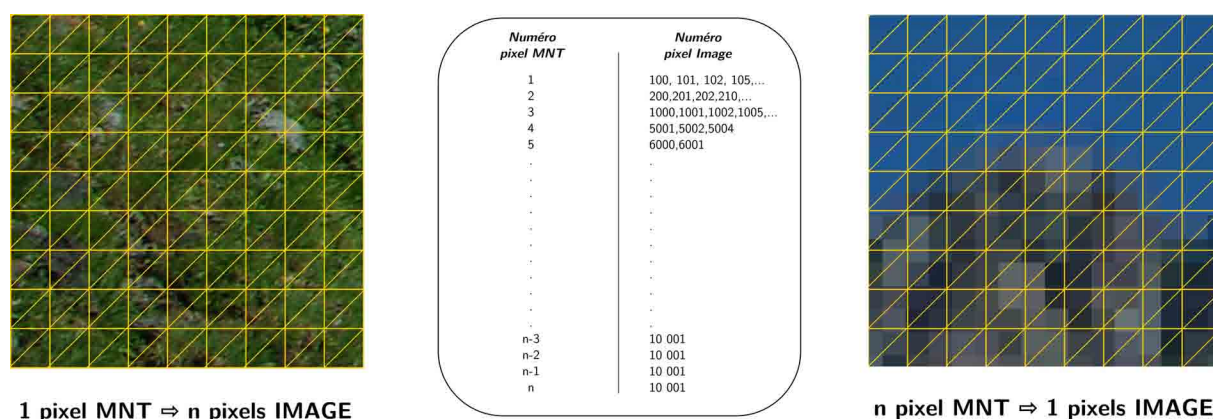


FIG. 6.9: Principe de l'algorithme des faces cachées implémenté

Le but de l'algorithme mis en place est de dresser la liste de correspondances entre pixels MNT et pixels Image. Il a été possible par ce biais, de représenter facilement sur un même support cartographique les pixels MNT qui possèdent une intersection avec les pixels image (donc visibles), de ceux qui ne possèdent pas d'intersection (invisibles). Le problème est ensuite d'attribuer des codes couleurs aux pixels MNT, ce qui est essentiel dans la phase de détection de neige qui suivra. Ainsi, on garde entièrement les informations sur les codes couleurs de l'image, et, pour chaque pixel MNT, on calcule la tendance moyenne des couleurs

CHAPITRE 6. DE L'IMAGE 2D À LA CARTOGRAPHIE 3D : IMPLÉMENTATION DE L'ENVIRONNEMENT 3D

le constituant. Il s'agit d'une simple opération de moyenne permettant de traiter l'information sur la couleur pour visualisation. Dans le cas de la neige, on calculera systématiquement le taux de pixels enneigés pour chaque pixel MNT pour lui attribuer ou non un enneigement. On pourra soit afficher l'image sur le MNT, soit afficher les cartes d'enneigement correspondantes.

6.5.2 Calcul des faces cachées sur les sites du Vorz :

Le calcul des faces cachées va déterminer les taux de couverture du capteur mis en place pour les deux sites d'observation du bassin versant. Les cartographies obtenues après l'étape de calage sont présentées dans les figures 6.10 et 6.11.

6.5.2.1 Site du Refuge Jean-Collet :

Le site du Refuge Jean-Collet échantillonne la partie médiane du bassin versant. Faisant directement face au versant opposé, sa prise de vue se rapproche de la perpendiculaire, pour laquelle les erreurs sont moins importantes du fait la profondeur de champ plus constante sur l'ensemble de l'image. La distance est de plus limitée, puisqu'il y a à peine 2 kilomètres de distance entre l'appareil et le point le plus éloigné de la scène, ce qui confère à la photographie une résolution correcte (Environ 1 mètre de résolution dans le fond de l'image).

6.5.2.2 Site du Lac Blanc :

Le site du Lac Blanc permet de visualiser l'ensemble de la partie sommitale du bassin versant qui comprend notamment le glacier de Freydane. Dans le cas présent la prise de vue est plus distante qu'au Refuge, avec un éloignement de 2 à 2.5 kilomètres des sommets, avec, de nombreuses surfaces assez peu pentées, ce qui rend compliquée la gestion de la profondeur de champ sur l'image. En conséquence la résolution sera probablement moins bonne sur ce site.

[illegible]

176

CHAPITRE 6. DE L'IMAGE 2D À LA CARTOGRAPHIE 3D : IMPLÉMENTATION DE L'ENVIRONNEMENT 3D

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 6 :

Ce chapitre a présenté les processus techniques et méthodes mathématiques permettant de passer d'une image en 2 dimensions à une cartographie en 3D. Pour cela, un utilitaire a été implémenté, facilitant à l'utilisateur le calage des paramètres caractéristiques de l'appareil photographique. Le principe est le suivant : l'utilisateur calibre un MNT de manière à simuler la même prise de vue qu'un appareil photographique sur le versant à l'aide des paramètres caméra que sont les angles (τ, σ, φ) , la position de l'appareil (X, Y, Z) , la distance focale et la distorsion. Lorsque ces paramètres sont calibrés pour un site donné, le logiciel calcul automatiquement les transformations géométriques permettant le passage à la 3D.

Pour effectuer ces transformations, on calcule une matrice des transformations géométriques qui effectue la relation entre les positions des points dans l'image et dans le monde réel. Cette relation permet alors de déterminer les faces cachées à la surface du bassin versant depuis le point de prise de vue. Ainsi, on obtient une relation de transformation de nos images en 3 dimensions pour chaque site d'étude, et, par la même occasion la cartographie sur le MNT des zones observables sur le bassin versant.

L'ensemble de ces méthodes mathématiques permet donc d'obtenir des cartes exploitables pour la suite du travail et constituaient le premier élément clé du système SnoDEC. Le second élément clé du système est la détection automatique de la neige sur les images. Nous allons maintenant présenter les techniques que nous avons développées.

6.5. CALCUL DES FACES CACHÉES ET MISE EN 3D DE L'IMAGE :

Chapitre 7:

Détection automatique de l'enneigement sur les images :

Sommaire du Chapitre:

7.1 Détection de la neige à partir des codages couleur :	181
7.1.1 De la photographie au traitement numérique :	181
7.1.2 Système de codage colorimétrique :	183
7.2 Les difficultés de la détection automatique de la neige :	186
7.2.1 Techniques exploratoires de détection de la neige :	186
7.2.2 Difficultés relatives à la détection des surfaces enneigées en milieux naturels :	189
7.2.3 Calibration des zones enneigées :	191
7.3 Technique des "droites de neige" :	194
7.3.1 Principe de la technique :	194
7.3.2 Mise en oeuvre et applications :	195
7.4 Utilisation d'un réseau de neurones :	196
7.4.1 Définition et principe de fonctionnement des réseaux de neurones :	196
7.4.2 Implémentation d'un réseau de neurones spécifique à la détection de la neige :	197

Introduction du Chapitre 7 :

La problématique la plus complexe à résoudre pour que le capteur SnoDEC fonctionne de manière automatique est la détection des zones enneigées dans les images. En effet, la neige, bien que clairement identifiable comme surface blanche par l'oeil humain, ne présente pas systématiquement un code couleur blanc dans la réalité numérique. Les conditions de luminosité jouent un rôle essentiel dans ce problème, et l'idée est donc de trouver une méthode, permettant de déterminer quelles sont les surfaces enneigées, qui soit indépendante des conditions d'acquisitions (luminosité, brouillard,...).

L'intérêt du système SnoDEC est de pouvoir être opérationnel quel que soit le temps, et d'apporter au minimum une image exploitable par jour. En conséquence, parmi les 5 à 7 images journalières, nous devons réaliser une détection correcte sur au moins l'une d'entre elle. Pour réaliser ces détections, nous nous appuyerons sur les codes couleurs numériques extraits des images, que nous analyserons statistiquement pour tenter d'en extraire les informations sur la neige.

Dans un premier temps, nous reviendrons sur les caractéristiques des codes couleurs dans les images numériques, et, nous verrons que nous avons à notre disposition de nombreuses solutions pour trouver les paramètres déterminant dans la détection de la neige (couleur blanche, luminosité, réflectance,...). Nous présenterons ainsi tout un ensemble de méthodes, fonctionnant de manière satisfaisante sur des images tests, mais ne pouvant être utilisées dans le cadre d'une utilisation automatique en série.

Devant ces problématiques, nous montrerons comment nous avons mis au point notre méthode statistiques des "droites de neige", à partir de l'élaboration d'une calibration des pixels enneigés par un utilisateur, à l'aide d'un logiciel implémenté spécifiquement. Enfin, nous discuterons des perspectives d'améliorations de la technique par l'utilisation d'un réseau de neurones.

Section 7.1

Détection de la neige à partir des codages couleur :

Dans ce travail, nous avons utilisé des appareils photographiques traditionnels, c'est-à-dire sans canal spécifique comme l'infrarouge par exemple. Pour réaliser le traitement numérique, nous disposons uniquement des informations photographiques sous forme de données numériques.

7.1.1 De la photographie au traitement numérique :

La photographie est l'ensemble des techniques qui permettent d'obtenir des images permanentes d'une scène instantanée, au moyen d'un dispositif optique produisant une image réelle sur une surface photosensible.

7.1.1.1 L'appareil photographique :

La première photographie a été réalisée par Nicéphore Niépce au cours du *XIX^{ème}* siècle. Depuis cette époque, des évolutions considérables ont été accomplies, et d'un temps de pose de 12 heures pour une image en noir & blanc de faible qualité, on est passé à des appareils permettant d'obtenir en quasi-instantané des images couleurs de près de 12 millions de pixels. Cependant, ce n'est que vers la fin des années 80, et plus particulièrement depuis une quinzaine d'années que l'évolution la plus importante s'est déroulée, avec le développement de l'informatique et des appareils photographiques numériques, qui permettent un "captage" direct de la lumière sous format électronique, sans passer par un support argentique.

Les appareils photographiques qu'ils soient argentiques ou numériques réalisent 3 étapes successives :

1. La capture de la scène, est réalisée par un système optique convergent formé de plusieurs lentilles et qui permettent de "réduire" la lumière de la scène à l'échelle du capteur photosensible. Cet objectif est caractérisé par une distance focale (grand angle, zoom,...), une ouverture (luminosité, éclairage de la scène) et permet d'obtenir des photos de différentes qualité, en laissant pénétrer la lumière à l'intérieur de la chambre noire.
2. La création de photo, se fait au niveau des sites photosensibles à l'intérieur de la chambre noire. Traditionnellement, on utilisait des appareils argentiques, dont le procédé de fixation de la photographie reposait sur des réactions chimiques, à la surface d'un film en plastique, entre la lumière et du Bromure d'Argent.
Dans les appareils photographiques numériques, le film est remplacé par un capteur CCD (*Charge-Coupled Device, ou dispositif à transfert de charge*) ou CMOS. Le rôle du capteur CCD est de transformer les photons lumineux reçus de la scène (rayonnement électromagnétique) en un signal analogique, puis numérique par l'intermédiaire d'un effet photoélectrique se produisant sur un substrat semi-conducteur.
3. Le stockage de la photographie, qui se faisait il y a encore quelques années uniquement sur des négatifs, puis sous format papier, est aujourd'hui quasi-uniquement numérique. Ainsi, l'appareil photographique est équipé d'une carte mémoire, de type et format variable, permettant le stockage des photographies provenant du capteur CCD sous format numérique. Le poids du fichier photographique dépend essentiellement de la résolution

7.1. DÉTECTION DE LA NEIGE À PARTIR DES CODAGES COULEUR :

du capteur. Aujourd'hui, les capteurs usuels atteignent 10MPix et une photographie pèse à entre 1Mo et 5Mo. Ainsi la capacité de stockage est fonction de la résolution du capteur, et de la capacité de la carte mémoire. Cette capacité est en évolution rapide et exponentielle, et on trouve aujourd'hui dans le commerce des cartes allant jusqu'à 32Go.

7.1.1.2 Photographie et format numérique :

Lorsque l'on réalise une prise de vue avec un appareil photographique numérique, la lumière est interceptée au niveau du capteur CCD. Il se produit alors une réponse au niveau de ce capteur sous forme d'impulsion électrique sur chaque site photosensible. Le principe utilisé est celui de la décomposition de la lumière en 3 couleurs mise en évidence par Thomas Young (1773-1829) à la fin du *XVIII^{ème}* siècle, et développé par Herman Von Helmholtz dans les années 50. Ainsi, la lumière reçue est décomposée en trois couleurs primaires : le rouge, le vert et le bleu, par l'intermédiaire d'un filtre RGB de Bayer (cf. figure 7.1).

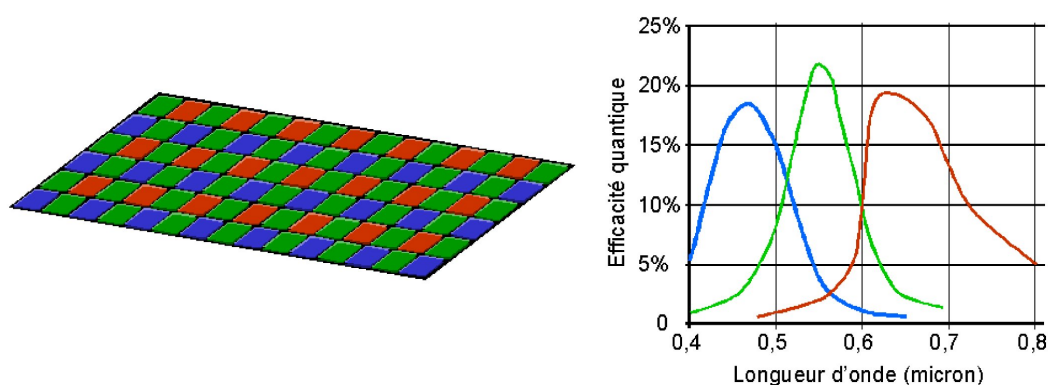


FIG. 7.1: Structure d'un filtre de Bayer et exemple de réponse du capteur CCD associé

Ainsi, chaque site photosensible du capteur CCD correspond à pixel final de l'image. En informatique, les pixels couleurs sont codés sur 24 bits. On a donc 8 bits par couleur (Rouge, vert, bleu), et donc $2^8 = 256$ nuances possible pour chaque couleur. Au final, on peut coder des images de plus de $256^3 = 16\,777\,216$ de couleurs. Lors du traitement numérique, chaque pixel aura 3 composantes de valeurs, comprises entre 0 et 255.

Au final, les images obtenues par l'appareil photographique sont stockées selon différents formats :

- Le JPEG est le format le plus courant, c'est en fait un format de fichier compressé pour lequel l'appareil réalise une compression à partir d'un algorithme standard. Lors de cette compression, des informations sont perdues mais ne détériorent pas la qualité de l'image pour l'oeil humain, pour ce qui est des faibles taux de compression.
- Le format TIFF qui correspond à des fichiers non compressés ou les informations de l'image ne sont pas détériorées.
- Le format RAW correspond à des fichiers propriétaires. L'algorithme de compression est donc propre à chaque fabricant et il est donc nécessaire de disposer d'un logiciel de décompression.

Lorsque l'image est enregistrée dans un fichier correct, le traitement de ses informations sur informatique peut alors commencer. On utilisera alors pour les différentes opérations les informations contenues dans les codes couleurs de chaque pixel.

CHAPITRE 7. DÉTECTION AUTOMATIQUE DE L'ENNEIGEMENT SUR LES IMAGES :

7.1.2 Système de codage colorimétrique :

Il existe de nombreux types de codes couleurs, l'objectif n'est pas d'en faire ici un inventaire total, mais de présenter les plus utilisés. Voici donc la liste non-exhaustive et le fonctionnement de quelques codes couleurs courants.

7.1.2.1 Code RGB :

Le RGB est le format de couleur le plus répandu et le plus couramment utilisé en informatique. Il a été mis au point en 1931 par la *Commission Internationale de l'Eclairage*, afin de permettre le codage et la représentation des couleurs par les tubes cathodiques des moniteurs. On définit ainsi les trois couleurs de base à partir des longueurs d'ondes suivantes :

- Le Rouge : longueur d'onde 700 nm
- Le Vert : longueur d'onde 546,1 nm
- Le Bleu : longueur d'onde 435,8 nm

L'ensemble de l'espace des couleurs est alors obtenu en "mixant" les couleurs primaires par synthèse additive. On représente traditionnellement l'espace de couleur ainsi obtenu sous forme de cube de couleur (cf. figure 7.2) dont les arêtes représentent les différents pôles : Noir & Blanc, Rouge-Vert-Bleu, Cyan-Magenta-Jaune.

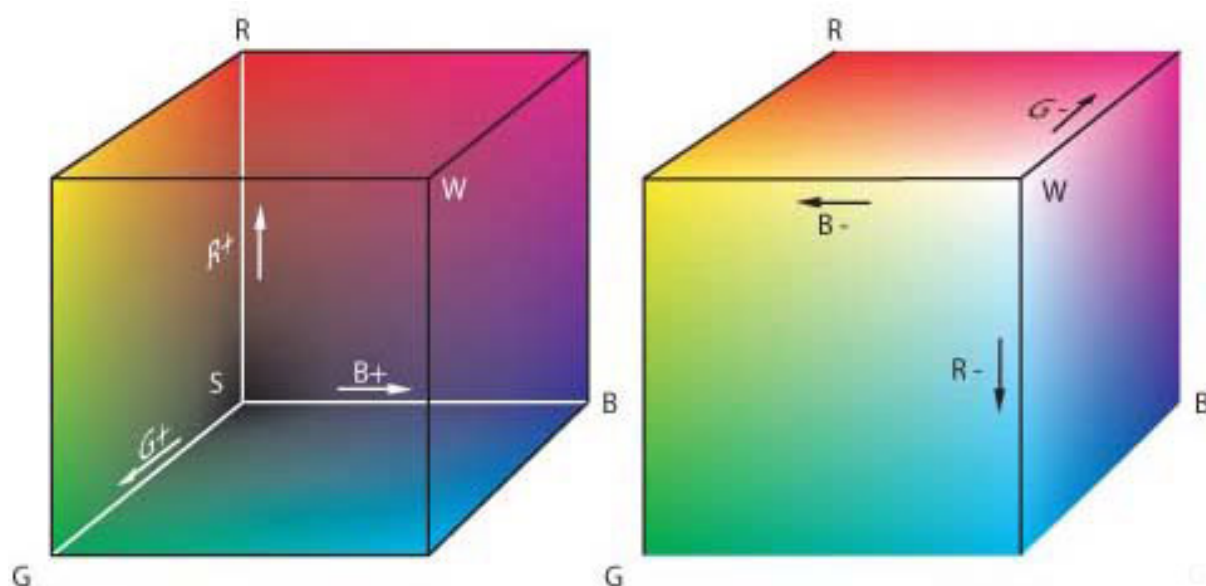


FIG. 7.2: Espace des couleurs RGB représenté sous forme cubique

7.1.2.2 Code HSV :

Le codage HSV (TSL en français) correspond à une représentation plus "naturelle" des couleurs, et plus proche de la vision "humaine". On représente ainsi la couleur selon trois composantes, dont une seule est nécessaire pour faire varier la couleur, les deux autres jouant sur la luminosité et la saturation.

Les 3 composantes se répartissent de la sorte :

- Hue (Teint) : Elle définit la couleur sur un cercle de 0 à 360°.
- Saturation (Saturation) : Décrit l'intensité, la pureté de la couleur (terne ou vive).

7.1. DÉTECTION DE LA NEIGE À PARTIR DES CODAGES COULEUR :

- Value (Luminosité) : La valeur ou luminosité indique la quantité de la lumière de la couleur sombre (noir) ou vive (blanc).

Une représentation conique de l'espace HSV permet de mieux comprendre l'agencement des couleurs à l'intérieur de celui-ci (cf figure 7.3). Il est à noter que cet espace permet de déterminer très facilement le type de couleur que l'on souhaite utiliser et, son degré de luminosité.

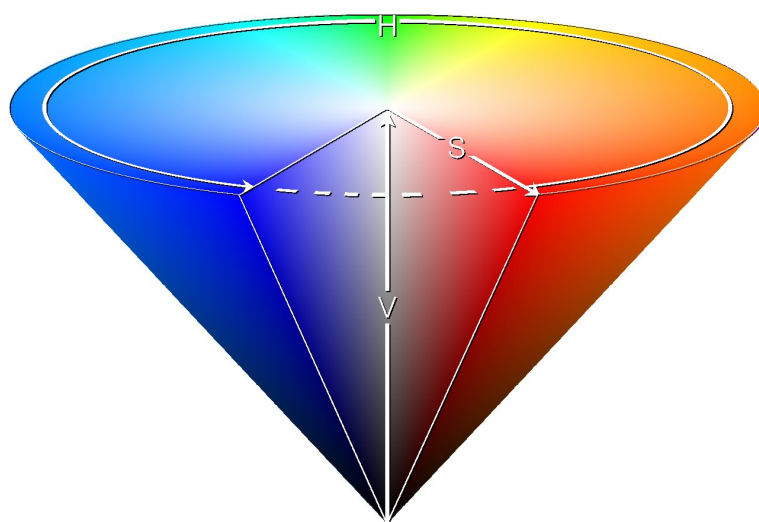


FIG. 7.3: Espace des couleurs HSV représenté sous forme conique

7.1.2.3 L'espace de couleur CIE-XYZ :

L'espace de couleur CIE-XYZ a été mis en place en 1931 par la *Commission Internationale de l'Eclairage*. Il permet de définir l'ensemble des couleurs visibles par l'oeil humain. L'idée de base est de représenter l'ensemble des couleurs à partir de deux variables, et de représenter la luminance ou la quantité de lumière sur une troisième composante. Les couleurs sont généralement représentées sur un diagramme (x,y), à la périphérie duquel sont positionnées les couleurs pures (rayonnement monochromatique) du spectre lumineux en fonction de leur longueur d'onde. On passe ainsi sur les contours de ce diagramme du bleu (420 nm) au rouge (680 nm), le "demi-cercle" ainsi formé étant refermé par la "ligne des pourpre" (du rouge au bleu).

Il existe plusieurs variantes à ce type d'espace dont nous ne présenterons que les deux plus utilisées en infographie.

a) Code CIE-xyY

L'espace CIE-xyY représente les couleurs en fonction de leur chrominance sur un axe (x,y), puis de leur luminance. Le long de l'axe, les couleurs sont représentées selon leur longueur d'onde. La luminance est calculée selon les proportions de rouge, vert et bleu, selon la formule suivante :

$$Y = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot V + 0,114 \cdot B \quad (7.1)$$

La figure 7.4 représente l'espace de couleur CIE-xyY, et plus spécifiquement la représentation de l'espace des couleurs :

CHAPITRE 7. DÉTECTION AUTOMATIQUE DE L'ENNEIGEMENT SUR LES IMAGES :

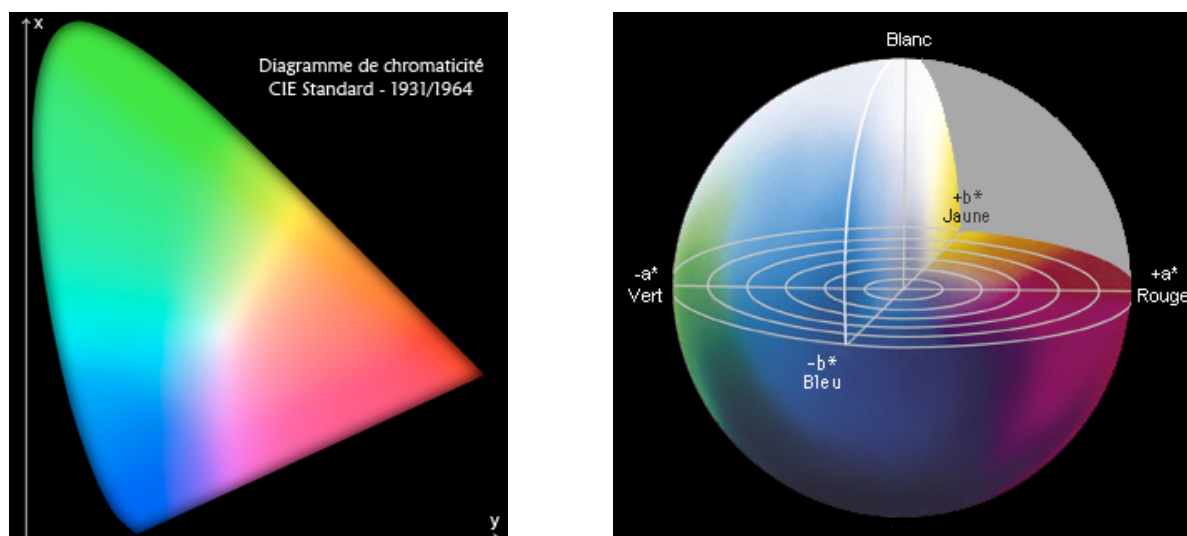


FIG. 7.4: Espaces des couleurs CIE-xyY représenté par le graphique de chromaticité (a) et CIE-L*a*b représenté sous forme de graphique 3D (b)

b) Code CIE-L*a*b :

L'espace de couleur L*a*b a été développé en 1976 par la *Commission Internationale de l'Eclairage*, avec pour objectif de représenter les couleurs et leurs distances, de manière similaire à l'oeil humain. Pour cela, on utilise deux paramètres de chromaticité (a,b) pour décrire la teinte d'une couleur, et, une troisième variable pour décrire sa luminance. On a donc :

- L : La clarté ou luminance de 0 (noir) à 100 (blanc)
- a : L'axe allant du rouge au vert (valeurs négatives) de 120 à -120 (blanc = 0, si la clarté vaut 100)
- b : L'axe allant du jaune au bleu (valeurs négatives) de 120 à -120.

Avec cette représentation des couleurs, on couvre l'intégralité du spectre de la vision humaine, et, on le représente de manière uniforme. L'intégralité des autres systèmes de couleurs tels, que le CMYK ou le RGB peut être défini dans cet espace, ce qui en fait un pôle de passage essentiel dans l'ensemble des logiciels d'infographie pour la transformation des couleurs. La représentation peut se faire sous forme sphérique (cf figure 7.4).

L'ensemble de ces systèmes de couleurs seront utilisés par la suite dans l'analyse des images d'enneigement, sur le dispositif expérimental d'observation de la couverture neigeuse. Il est donc important de comprendre leur spécificité et leur fonctionnement, afin des les utiliser le plus judicieusement possible.

Section 7.2

Les difficultés de la détection automatique de la neige :

Compte tenu du grand nombre d'images pouvant être obtenues par le système SnoDECC, il était essentiel d'automatiser la phase de détection des zones enneigées puisqu'il était impossible de réaliser ce traitement manuellement. L'utilisation d'appareils photographiques classiques a considérablement complexifié la détection automatique de la neige sur les images. En effet, dans ce cadre, il n'était possible d'utiliser que les codes couleurs présentés précédemment pour réaliser la détection automatique. Il est probable que des images infra-rouge auraient permis de mieux contraindre cette phase du travail et rendues le processus de détection plus efficace.

7.2.1 Techniques exploratoires de détection de la neige :

Au cours de nos travaux, nous avons mis au point et testé de nombreuses méthodes de détection des surfaces enneigées. Ces méthodes se sont révélées très simples ou très complexes à mettre en oeuvre, mais surtout elles ont montré des taux de réussite ou d'échec très différents et variables selon les conditions de prise de vue. Dans ce contexte, il était délicat de déterminer la méthode idéale et adéquate pour cette tâche. Malgré tout, certaines méthodes ayant montré des taux avancés de réussite, nous avons apporté les améliorations nécessaires à une exploitation des données acquises.

7.2.1.1 Méthode des seuils :

L'idée développée dans un premier temps, a été de réaliser la détection de la neige via les codes RGB, ou d'autres codes couleurs, en les seuillant pour isoler les pixels correspondant à l'enneigement. Nous avons rapidement constaté les limites de ce type de méthode. En effet, même si les codes couleurs sont différents, ils sont tous basés sur une information unique de base. Il est dès lors difficile dégager les caractéristiques qui ne sont pas forcément isolables de manière adéquate. De plus, les seuils peuvent varier selon les conditions d'ensoleillement de l'image (cf fig.7.5), et ils nécessitent une calibration préalable. Or, à ce moment là du travail, nous ne souhaitons pas avoir recours à une calibration sur chacun des deux sites. En outre, cela posait le problème de détection des conditions de lumière dans l'image avant de passer à la phase de détection avec les seuils adaptés.



FIG. 7.5: Exemple de détection par la technique des seuils : Efficace à gauche et perturbée par l'ombre à droite

CHAPITRE 7. DÉTECTION AUTOMATIQUE DE L'ENNEIGEMENT SUR LES IMAGES :

La technique des seuils a montré de très bons résultats sur des images possédant peu de variations de couleurs sur la neige elle même. Ainsi, des éclaircissements forts ou faibles du manteaux neigeux permettent de lui donner une couleur homogène, un simple seuil suffisant à séparer efficacement la neige de l'herbe ou des rochers. Cependant, dès que des contrastes forts apparaissent, la nécessité de plusieurs seuils ou le chevauchement de profils colorimétriques proches, comme ceux des rochers ou de l'herbe par exemple, pose des problèmes insolubles. Malgré tout, les méthodes basées sur les seuils RGB (détection du blanc) ou HSV (détection des surfaces lumineuses) permettent d'obtenir rapidement de bon résultats pour des travaux menés sur des images aux conditions d'ensoleillement satisfaisantes.

7.2.1.2 Image de référence :

A la suite des méthodes à seuil, nous avons compris que la réelle difficulté venait de la mise en évidence de l'hétérogénéité des couleurs dans l'image, notamment du point de vue de la luminosité. Nous avons donc essayé de réaliser la détection de ces hétérogénéités à partir d'une image de référence. Pour cela, une image du versant totalement dénégé était utilisée, puis, les différences majeures permettaient en période d'enneigement de discerner les zones enneigées des autres. Malheureusement, les conditions de luminosité étant cette fois-ci maîtrisées, il est apparu que l'évolution du milieu (couleur de la végétation, humidité sur les roches,...) posait les mêmes problèmes que l'évolution de la luminosité. Cette méthode bien qu'efficace dans les mêmes conditions que précédemment a donc été délaissée pour une détection automatique des surfaces enneigées.

7.2.1.3 Filtres de contours :

Après avoir travaillé essentiellement sur l'aspect numérique des codes couleurs de l'image et au vu des difficultés posées par les conditions de luminosité du milieu, il devenait nécessaire de changer d'approche. Pour cela, nous n'avons plus considéré l'image pixel par pixel, mais nous avons travaillé par zonage. L'objectif était ici de discerner des zones marquées de l'image, puis, de déterminer si ces zones étaient enneigées ou non. Il devenait donc en théorie possible de regrouper la neige en zones de couleurs différentes (ombre, soleil,...) et de la distinguer du milieu environnant.

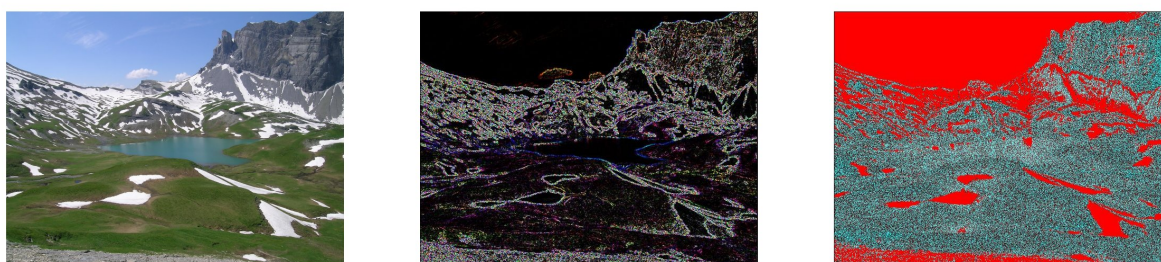


FIG. 7.6: Détection de la neige par utilisation de filtres numériques : 1-Image initiale ; 2-Application d'un filtre de Sobel ; 3-Résultat de la détection

La première étape nécessitait l'implémentation d'un filtre sur l'image, permettant de détecter les principaux contours qu'elle renfermait. Pour cela, nous avons utilisé un filtre classique et efficace en traitement de l'image : le filtre de Sobel. Après avoir passé l'image dans ce filtre, de nombreux contours se dessinaient sur l'image ; le travail consistait alors à déterminer si chaque contour renfermait ou non de la neige, et, de là, de délimiter les contours eux-mêmes

7.2. LES DIFFICULTÉS DE LA DÉTECTION AUTOMATIQUE DE LA NEIGE :

(cf fig.7.6). Les difficultés rencontrées précédemment ressurgissaient lors de cette deuxième étape. En conséquence, cette méthode permettait d'améliorer quelque peu les résultats précédents, mais, elle ne présentait pas d'améliorations majeures.

7.2.1.4 La migration des pôles :

Toujours dans cette perspective de créer une carte de zonage de l'image pour discerner la neige, nous nous sommes intéressés à l'allure des histogrammes RGB des images que nous étudions. A partir de ceux-ci, il est possible de déterminer quels sont les pôles colorimétriques principaux de l'image. A partir de ces pôles, dont le nombre peut être calibré ou déterminé statistiquement par analyse du profil, chaque pixel de l'image est rapproché du pôle dont il est le proche, et on obtient ainsi une carte des pôles colorimétriques de l'image. A partir de cette carte, il ne reste plus en théorie qu'à déterminer si un pôle est neigeux ou non. Cependant, lors de l'opération de tri des pixels, que nous avons nommé migration des pôles, les pixels sont classés, et, il apparaît que les pixels neige sont susceptibles d'être répartis de manière importante tout le long du profil et de ne pas se concentrer vers un pôle blanc unique, ou même se mélanger avec d'autres pôles. De fait, en fonction des conditions générales, la détection était plus ou moins efficace.

7.2.1.5 Carte de probabilité :

Devant les difficultés rencontrées et le nombre de méthodes implémentées, il devenait indispensable de réaliser un tri de celles-ci. Ce tri des méthodes et le bilan en résultant mettait en évidence les forces et les faiblesses de chacune, mais surtout, mettait en lumière le fait qu'avec l'ensemble de ces techniques la plupart des problèmes avaient une solution parmi les différentes méthodes. Nous avons donc compilé ces méthodes et entamé la création d'un indice d'enneigement reposant simplement sur un score attribué à chaque pixel. En réalité, pour chaque méthode, on détermine si le pixel est enneigé ou non, puis, on classe les pixels selon leur score. L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle ne donne pas une réponse déterminée sur l'enneigement du pixel, elle se contente d'en estimer la possibilité (cf fig.7.7). Or, au vu des incertitudes auxquelles nous aurons à faire face dans la modélisation hydrologique, il était inenvisageable d'en ajouter sur les données d'entrée et de la calibration du système.



FIG. 7.7: Carte des probabilités d'enneigement : Forte probabilité (Blanc), Incertitude (Vert), faible probabilité (Rouge)

Les cartes résultant de cette méthode présentaient donc trois niveaux de probabilités (forte, faible, incertitudes majeures), mais, les résultats étaient très satisfaisants. En effet, dans le pire des cas, la neige était classée dans le niveau médian (incertitude), mais des erreurs majeures se produisaient rarement. Pour plus de raffinement, des niveaux de probabilités ont parfois été ajoutés, et des pondérations ont été placées pour chaque méthode, mais cela n'a malheureusement pas amélioré, bien au contraire les taux de réussite.

CHAPITRE 7. DÉTECTION AUTOMATIQUE DE L'ENNEIGEMENT SUR LES IMAGES :

En conséquence, il est apparu à l'issue de ces différentes recherches que la neige se caractérisait par de fortes variabilités colorimétriques liées à la luminosité de la scène. De plus, le milieu évoluant au cours de la saison, des éléments extérieurs pouvaient perturber de manière importante la sélection des pixels neige. Nous avons donc décidé de faire le bilan du profil colorimétrique général de la neige, puis de l'analyser afin de déterminer une méthode de détection plus robuste que celles implémentées précédemment.

7.2.2 Difficultés relatives à la détection des surfaces enneigées en milieux naturels :

Comme on vient de la voir, la difficulté principale de la détection de la neige est l'hétérogénéité du profil colorimétrique en fonction des conditions lumineuses, et donc essentiellement en fonction de la météorologie. De plus, il faut noter que ces difficultés sont particulièrement présentes lorsque l'on observe des différences au sein d'une même image, avec de forts contrastes. Afin de bien cerner la problématique, nous allons voir quelques exemples qui montrent pourquoi la détection de la neige est rendue complexe. Ces difficultés sont inhérentes aux milieux naturels dans lequel nous ne maîtrisons pas les conditions de prise de vue de la photographie, de fait, peu de méthodes existent pour s'en affranchir.

7.2.2.1 Conditions de luminosité :

La lumière est très variable au cours de l'année et des journées sur les bassins versants. En voici quelques exemples marquants :

a) *Contraste ombre/soleil* :

Dans de nombreux cas, il existe un moment dans la journée où la course du soleil implique qu'une partie du bassin versant est fortement éclairée, tandis que l'autre partie se trouve à l'ombre. Dans ces conditions, il est difficile de segmenter la neige d'un côté et de l'autre avec le même critère de reconnaissance. En effet, dans de nombreux cas, la neige exposée au soleil est bien blanche, tandis que contrairement à nos impressions, la neige côté ombre a tendance à avoir des codes colorimétriques très proches du bleu (cf figure 7.8). En conséquence, la détection devient très difficile, car il est nécessaire d'identifier de la neige bleue dans une partie de l'image et de la neige blanche dans l'autre, sans toutefois connaître précisément la ligne de séparation entre les deux zones.

7.2. LES DIFFICULTÉS DE LA DÉTECTION AUTOMATIQUE DE LA NEIGE :

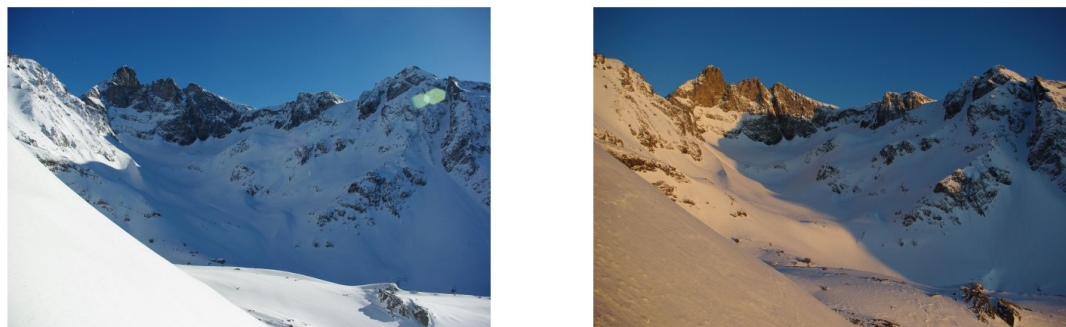


FIG. 7.8: Exemple d'images à forts contrastes ombre/soleil

b) Surexposition :

Une autre situation pouvant se produire et impliquant des problèmes d'intensité lumineuse est la surexposition ou l'éblouissement par le soleil. Dans ces cas là, la plupart des surfaces sont complètement éclairées et peuvent même être luisantes par endroit. Ainsi, certaines faces rocheuses par exemple se reflètent et peuvent être amenées à devenir blanches, et ainsi être confondues avec la neige. La difficulté ne vient donc plus de la détection de la neige, mais plutôt de la non-détection des faces rocheuses.

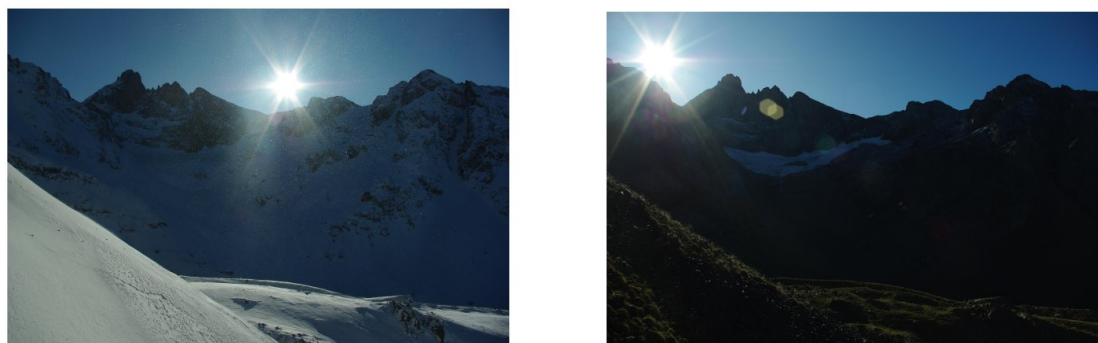


FIG. 7.9: Exemple d'images face au soleil rendant la détection très difficile

7.2.2.2 Interaction avec le milieu :

Au cours de la saison, les conditions de la montagne évoluent, et par conséquent, la colorimétrie des surfaces évolue également. L'exemple le plus frappant est celui de la végétation. Il existe ainsi plusieurs périodes clefs durant lesquelles la détection peut s'avérer délicate comme l'automne (cf fig.7.10).

CHAPITRE 7. DÉTECTION AUTOMATIQUE DE L'ENNEIGEMENT SUR LES IMAGES :

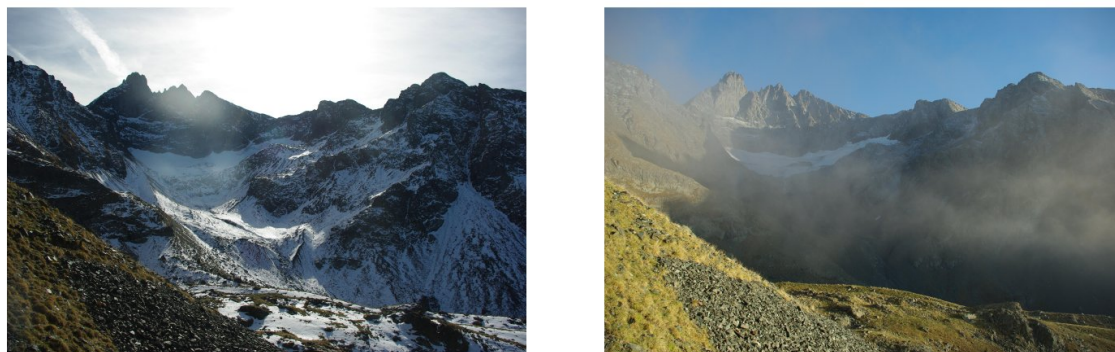


FIG. 7.10: Exemple d'images la détection est rendue difficile par le milieu (végétation, halo, brume,...)

En automne, l'herbe en particulier peut prendre une teinte brunâtre ou jaunâtre, et dans ces conditions devient très proche du profil colorimétrique de la neige, notamment avec l'utilisation des techniques de seuils. Il se produit ainsi des surestimations des surfaces enneigées, avec des détections de zones non appropriées. Dans un second temps, et de manière plus ponctuelle, certaines zones herbeuses très vertes au printemps peuvent passer au travers du filtre et être détectées comme des surfaces enneigées.

Les rochers constituent également un problème, comme on l'a vu lorsqu'ils sont fortement éclairés par le soleil, mais également lorsqu'ils présentent une forte humidité. Leur brillance atteint alors des valeurs fortes, et il est possible qu'il soient détectés comme de la neige.

7.2.2.3 Couverture nuageuse :

La couverture nuageuse ou le brouillard sur le versant est un problème liés aux conditions météorologiques qui intervient fréquemment dans les images où l'on réalise la détection automatique. Il est évident que dans cette situation, l'ensemble des nuages étant blancs, ils sont systématiquement considérés comme de la neige par l'algorithme, à l'exception de quelques masses nuageuses plus grises qui peuvent y échapper. Pour remédier à ce problème, un filtre de "l'espace ciel" a été développé et il élimine automatiquement les zones de ciel de l'image avant de commencer la détection. En revanche, lorsque les nuages masquent le versant, nous verrons dans le chapitre suivant comment nous allons les traiter. En réalité, ici, nous ne nous intéressons qu'à la détection de la neige, la qualité des images n'intervient qu'en critère secondaire, car la sélection des images utilisables intervient en aval de ce processus. Ainsi, la problématique de la couverture nuageuse est le problème le plus simple à résoudre dans notre cas, puisqu'elle se soldera par un tri automatique des images utilisables, en fonction des conditions météorologiques.

7.2.3 Calibration des zones enneigées :

Après avoir étudié diverses techniques de détection et mis en lumière les facteurs de complications de la détection automatique, nous sommes en mesure de tirer plusieurs constats :

- L'hétérogénéité colorimétrique des pixels neige pose problème
- Les conditions de luminosité ont un impact fort sur les critères de sélection des pixels
- Les conditions environnementales viennent complexifier la détection

7.2. LES DIFFICULTÉS DE LA DÉTECTION AUTOMATIQUE DE LA NEIGE :

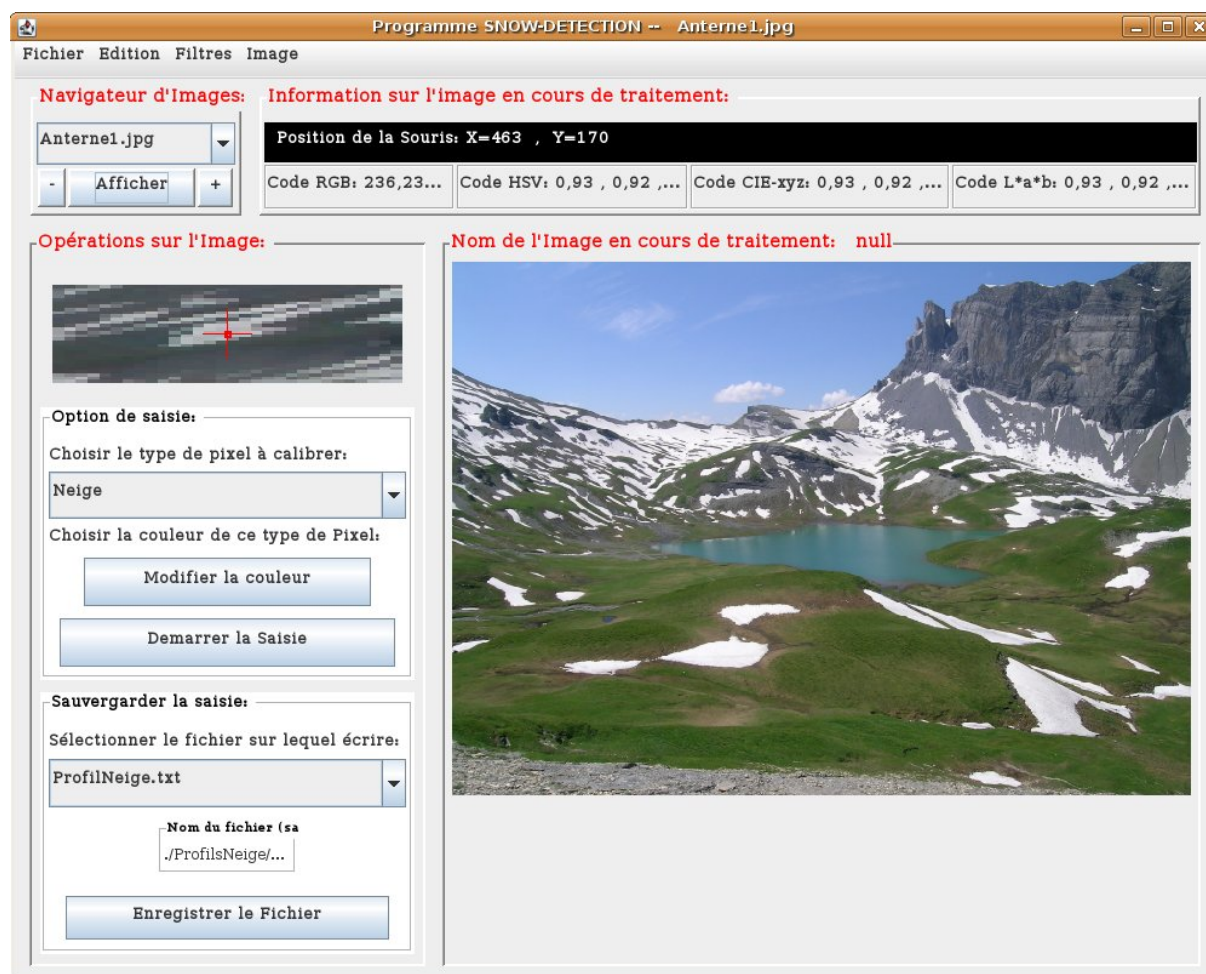


FIG. 7.11: Le logiciel de calibration des pixels enneigés

En conséquence, nous avons décidé de réaliser une librairie de codes colorimétriques des pixels neige, dans différentes conditions de luminosité, pour différentes saisons et sur différents sites, afin de rendre cette librairie la plus exhaustive et indépendante possible du lieu.

7.2.3.1 Utilitaire de détection de l'enneigement :

A l'image de ce qui a été fait pour l'analyse 3D, nous avons créé une interface Java permettant à un utilisateur de réaliser la saisie de ses propres images de calibration facilement. La figure 7.11 présente l'interface développée.

Le principe de l'interface est relativement simple, et permet de rapidement ouvrir les dossiers contenant les images que l'on souhaite calibrer. Le navigateur d'images permet alors de passer d'une image à l'autre pour avancer dans la détection des pixels. La fenêtre de saisie est constituée de l'image en cours, et lorsque l'on clique sur les pixels enneigés, on dispose de leur position et de la valeur de leurs différents codes colorimétriques. De plus, afin d'être précis dans la saisie pour certaines zones complexes, une fenêtre de zoom permet de voir en gros plan le pixel que l'on est en train de sélectionner. Il existe ensuite un onglet permettant de déterminer si on calibre des pixels neige, rocher, herbe ou encore ciel. Ainsi, la bibliothèque s'enrichit de codes colorimétriques qui ne sont pas neigeux, et permettront de contraindre la détection. Enfin, l'ensemble des résultats peut être exporté sous forme de fichier qui récapitule

CHAPITRE 7. DÉTECTION AUTOMATIQUE DE L'ENNEIGEMENT SUR LES IMAGES :

pour chaque image l'ensemble des pixels calibrés et leur code RGB.

L'interactivité de la fenêtre de calibration permet de saisir rapidement les pixels enneigés, et, une fois ceux-ci sélectionnés ils apparaissent en rouge, ainsi que tous les autres pixels identiques dans l'image. Cela permet d'avoir un contrôle sur la saisie en cours et de mieux discerner les zones de vide ou des calibrations sont nécessaires. A la suite de cette étape, il est possible de lancer directement depuis la fenêtre le traitement automatique des images en stock par la méthode que nous allons présenter, afin de vérifier le calage correct du jeu de données.

7.2.3.2 Caractéristiques des pixels et représentativité :

L'ensemble des informations récupérées par l'intermédiaire de cette fenêtre vont permettre de réaliser des traitements de statistiques et de probabilités sur les codes couleurs des pixels, de manière à en retirer des informations utilisables pour une détection automatique. L'information que nous allons utiliser ici sera essentiellement sous forme de code RGB.

Lors de la phase de sélection des pixels, il est important d'échantillonner sur les images les plus différentes possibles, mais également de sélectionner un maximum de zones sur l'image. Du point de vue du type d'images, on veillera particulièrement à posséder dans notre base de calibration des images à fortes variations lumineuses de type ombre/soleil ou surexposition, mais également des images avec de la couverture nuageuse, du temps médiocre et sombre, des images en bonnes conditions,... Un échantillonnage sur l'ensemble de la saison peut également être un plus, puisqu'il permet de connaître la course du soleil ou les variations environnementales (cycle végétatif), et donc les différents pixels susceptibles de se situer dans des zones problématiques. Au final, une trentaine d'images semble être une taille raisonnable pour un bon échantillon de calibration.

Au sein de l'image, l'échantillonnage des pixels doit se faire sur un maximum de zones possibles. Il est ainsi illusoire de voir sélectionner tous les pixels d'une zone donnée qui la plupart du temps ont des codes colorimétriques proches, quelques uns suffisent amplement. A l'inverse, il est essentiel de "cliquer" des pixels sur la totalité de l'image et de ne pas laisser de zones vides, afin de recueillir un maximum d'informations et de diversité sur les codes couleurs des pixels dans différentes situations : en fond de talweg, exposés au soleil, à l'ombre, sur des rochers, en période de fonte, au niveau des zones limites,... L'échantillonnage ainsi réalisé sera donc utilisé dans la librairie de pixel, afin d'appliquer la technique que nous allons maintenant présenter.

Technique des "droites de neige" :

7.3.1 Principe de la technique :

La technique que nous avons baptisée des droites de neige est née de l'analyse des fichiers de calibration issus de la librairie de pixels. Le constat relativement simple est le suivant, lorsque l'on représente les codes RGB des pixels sur un graphe ($R = f(G)$), ($R = f(B)$), ($G = f(B)$), on remarque rapidement que l'essentiel des pixels se regroupe le long d'un axe linéaire que l'on peut caractériser avec une droite précise, dont la corrélation est très bonne (cf fig.7.12). Ainsi, il semble que les caractéristiques colorimétriques des pixels enneigés se regroupent le long d'un axe dont on peut calculer précisément l'équation. De fait, nous avons utilisé cet axe spécifique pour tester les résultats sur nos échantillons. Les premiers tests ont montré une amélioration significative par rapport aux méthodes précédentes.

Au vu des résultats encourageants, nous avons décidé d'affiner la technique afin de mieux détecter les pixels posant problème, à savoir essentiellement ceux se trouvant dans les zones ombrées des images. Pour cela, nous avons utilisé une sélection d'images spécifiques possédant des grandes plages d'ombres pour enrichir la base de donnée. A partir de cette base spécifique, il a été possible de déterminer une nouvelle droite plus adaptée aux neiges à l'ombre. Ainsi, il existe plusieurs droites aux équations précises qui permettent de caractériser différents types de neige.

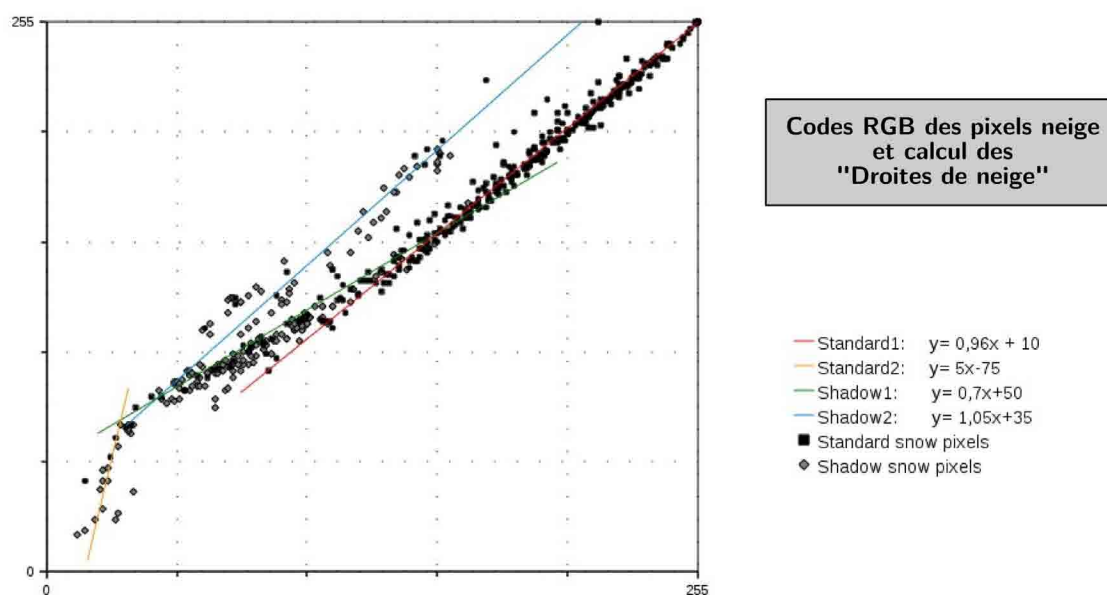


FIG. 7.12: Représentation graphique de quelques composantes des droites de neige (général, ombre)

CHAPITRE 7. DÉTECTION AUTOMATIQUE DE L'ENNEIGEMENT SUR LES IMAGES :

L'avantage majeur de cette technique est qu'elle est très rapide à mettre en oeuvre, puisqu'une simple calibration suffit à déterminer les droites de neige. De plus cette technique a été évaluée sur différents sites de mesures, et, il s'avère qu'une même droite s'adapte parfaitement à plusieurs types de conditions, et que les taux de réussites ne sont pas différents. De fait, la technique semble transposable facilement et se révèle universelle pour détecter la neige.

7.3.2 Mise en oeuvre et applications :

Une fois la détermination des droites de neige effectuée, la détermination de l'enneigement ou non d'un pixel est relativement aisée et très rapide. En effet, lors du traitement, on calcule pour chaque pixel d'une image donnée sa position par rapport à la droite de neige. En appliquant une petite tolérance sur les valeurs alentours à la droite, on regarde alors s'il se situe dans la zone de neige ou non.

De fait, l'application de la technique est rapide et permet de traiter un grand nombre d'images, venant de sites différents, quelles que soient les conditions environnementales. On répond ainsi à notre problématique de trouver une technique permettant d'être exportée sur d'autres sites, et ne nécessitant pas une phase de calibration chronophage pour chaque mise en place, puisqu'il existe des droites universelles pouvant être appliquées. Cependant, chaque site étant unique, il peut être intéressant de mener une petite calibration sur chacun d'eux de manière à affiner l'équation de la droite de neige.

Section 7.4

Utilisation d'un réseau de neurones :

La technique de reconnaissance de la neige que nous avons développée repose sur l'analyse d'une bibliothèque de codes colorimétriques qui permet de déterminer les systématismes et d'en extrapoler le comportement. Ce type de raisonnement reposant essentiellement sur des considérations statistiques est très proche de celui d'un type de modèle souvent utilisé en hydrologie ou pour ce type de travail : le réseau de neurone. Dans ce cadre, nous avons étudié la possibilité de migrer le système de détection vers un tel modèle.

7.4.1 Définition et principe de fonctionnement des réseaux de neurones :

7.4.1.1 Définition :

Les réseaux de neurones s'inspirent du concept de fonctionnement synaptique des neurones biologiques, et appartiennent aux familles de modèles statistiques et d'intelligence artificielle. Un neurone est un élément mathématique qui constitue un simple opérateur effectuant une combinaison linéaire de ses entrées et applique ce résultat à une fonction non linéaire. Par définition, le réseau de neurones est une combinaison de neurones connectés entre eux, et pondérés par des coefficients synaptiques auxquels on applique une fonction de décision (ou de combinaison). Cette structure est représentée dans la figure 7.13.

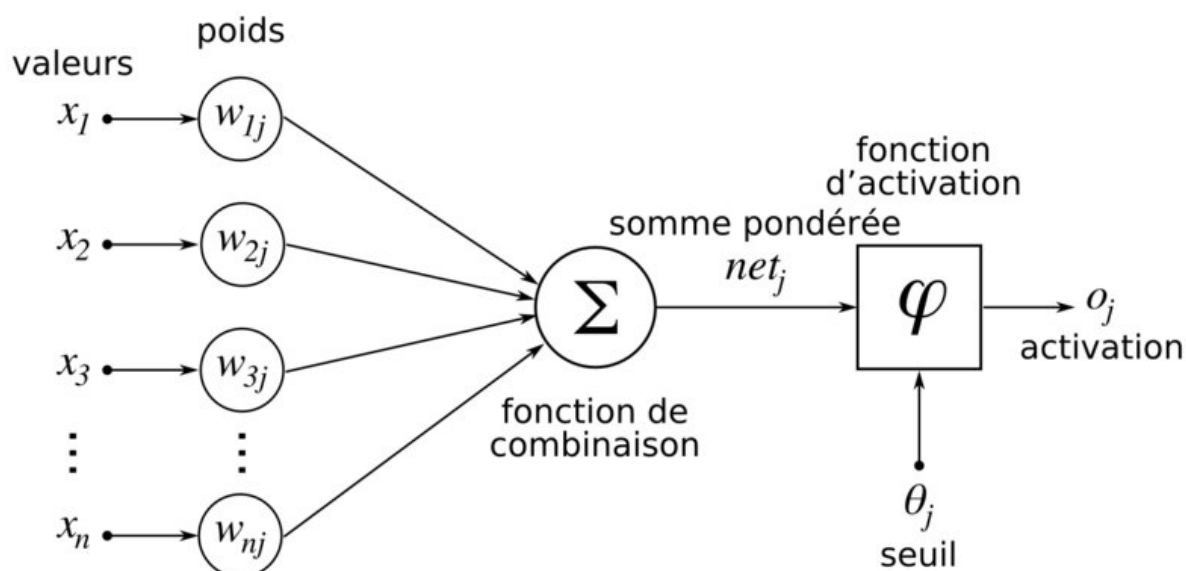


FIG. 7.13: Schéma théorique de la structure d'un réseau de neurone (Source Wikipedia)

Pour fonctionner, un tel réseau nécessite une base de donnée d'apprentissage qui lui permet de déterminer à partir de données d'entrées et de sorties connues les fonctions de décisions et les poids de chaque coefficient synaptique. A la suite de cet apprentissage statistique, le réseau est capable de travailler sur des données nouvelles et d'en modéliser le fonctionnement ou d'en interpréter le sens.

CHAPITRE 7. DÉTECTION AUTOMATIQUE DE L'ENNEIGEMENT SUR LES IMAGES :

7.4.1.2 Principe de fonctionnement :

Il existe de nombreux types d'architectures pour les réseaux de neurones. L'architecture la plus simple et la plus utilisée est le réseau non bouclé à couche simple, généralement appelé perceptron. Sa structure est particulièrement adaptée à la classification d'éléments, et sera donc particulièrement intéressante dans notre cas. Des structures plus complexes peuvent également être mise en place, telles que les réseaux non bouclés multicouches pour lesquels on intègre des neurones cachés entre entrées et sorties, ou encore les réseaux à rétroaction. La figure 7.14 représente quelques structures possibles pour un réseaux de neurones.

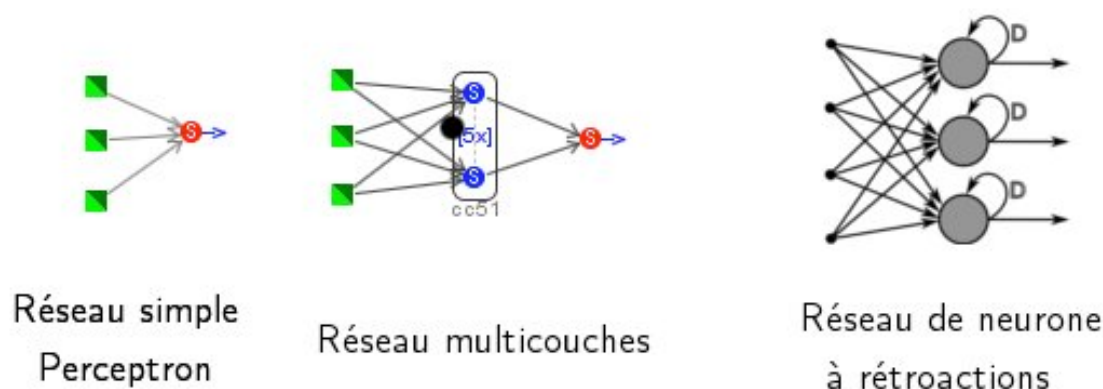


FIG. 7.14: Exemple de structures de réseaux de neurones

Lorsque l'architecture du réseau est déterminée et la phase d'apprentissage terminée, le réseau de neurones peut permettre l'utilisation en "mode classification", qui sera particulièrement utile dans notre cas. Ainsi, il est possible de déterminer des séparations linéaires entre différents éléments de la base de données. On peut également utiliser des séparations non-linéaires plus complexes reposant sur des changements de coordonnées, des séparations en classes virtuelles ou des exclusions. Dans tous les cas, le bon fonctionnement du réseau de neurones est en grande partie fonction de l'efficacité de la phase d'apprentissage du réseau. Cette phase requiert donc un bon échantillonnage de l'objet que l'on souhaite analyser par la suite.

7.4.2 Implémentation d'un réseau de neurones spécifique à la détection de la neige :

Le travail d'implémentation du réseau de neurones a été réalisé en collaboration avec l'Ecole des mines d'Alès, dans le cadre d'un stage d'étude de plusieurs étudiants. A cette occasion, ils ont travaillé sur une base de données conséquente que nous leur avons fournie. Les méthodes et résultats que nous allons maintenant présentés sont issus de leur rapport final.

7.4.2.1 Analyse de l'objet neige :

Au cours de cette étude, les étudiants ont montré que des méthodes simples de détection de neige pouvaient conduire à de bon résultats. En effet, en utilisant la luminosité du ciel

7.4. UTILISATION D'UN RÉSEAU DE NEURONES :

sur l'image, il semble possible de déterminer un lien avec la neige, puisqu'elle reflète le ciel dans la plupart des cas dans une couleur proche de celui-ci. Selon cette méthode, les taux de réussite de détection sont proche de 80% pour des images prises dans de bonnes conditions de luminosité.

7.4.2.2 Séparation linéaire :

Par la suite, le réseau de neurone *RNF Pro* développé à l'*Ecole de Mines d'Alès* a été utilisé pour construire un réseau cohérent avec les données des pixels neige. La structure relativement simple du réseau basé, sur les trois entrée R,G et B et reposant sur l'utilisation d'une fonction seuil, a été testée sur une base de 400 pixels enneigés et 400 pixels non-enneigés, dont 300 utilisés pour la phase d'apprentissage. Selon cette méthode, et en faisant varier les tailles des échantillons d'apprentissage et de validation, les résultats ont montré des taux de réussites comprise entre 73% et 89%.

7.4.2.3 Classification de pixels image :

Afin d'améliorer ces résultats, et, en constatant que le facteur limitant de la détection était la présence de certains type d'éléments difficiles à classer (herbe, rocher), les étudiants ont construit une base de données apportant une spécification pour chaque pixel sur le type d'élément qu'il représente. Ainsi, un découpage en classes a été effectué, et, lors de la phase d'utilisation du réseau de neurones, les classes étaient comparées deux à deux afin de trier correctement les pixels selon 4 possibilités : neige, neige à l'ombre, rocher, herbe. La validation de cette démarche a permis d'atteindre de très bons résultats avec des taux de reconnaissance corrects à plus de 80% sur les données de la base. Ainsi, sur des images prises en bonnes conditions, il est possible de détecter quasiment l'intégralité des surfaces enneigées.

La mise en place d'un réseau de neurones semble une bonne alternative et un bon complément à la méthode des droites de neige. Il apparait donc que la détection de la neige soit réalisable automatiquement et que les méthodes les plus adaptées sont de type statistiques et reposent sur des algorithmes de séparation linéaire. Dans le futur, le travail réalisé par l'*Ecole des mines d'Alès* pourra être réutilisé, puisqu'à l'image de ce qui a été fait dans notre cas, un utilitaire permet d'utiliser le réseau de neurones sur les nouvelles données des saisons futures.

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 7 :

La détection des surfaces enneigées est donc une tâche complexe à réaliser de manière automatique. En effet, il semble difficile de mettre au point une méthode basée sur l'analyse simple des codes couleurs par l'intermédiaire de systèmes de seuil, notamment en raison des variabilités de la couleur de la neige dans les images, selon les conditions de luminosité ou climatiques. Pour palier à ce problème, nous avons eu recours à la calibration des pixels neige.

Avant de procéder à la détection, on calibre les pixels neige manuellement sur un échantillon d'images variées rassemblant les conditions les plus difficiles (contrastes, brumes, ombre, soleil,...). Cette calibration nécessite l'utilisation de peu d'images (entre 20 et 30) pour être efficace, et se fait à l'aide d'un logiciel permettant de sélectionner les pixels neige avec une assistance informatique.

Lorsque la calibration est réalisée, on dispose d'une librairie de pixels neige sur laquelle on va réaliser des analyses numériques, en fonction des valeurs des codes couleurs de base : Rouge, Vert et Bleu. A la suite de cette analyse, on est capable de calculer des "droites colorimétriques de neige", correspondant à la neige dans la réalité. Le calcul de l'éloignement à ces droites permet de classer les pixels des images de notre base de données.

A l'avenir, une technique alternative basée sur les réseaux de neurones va probablement être développée, celle-ci étant particulièrement adaptée à ce type de problématique et présentant de bon résultats.

Maintenant que nous avons relevé les deux challenges techniques du système Sno-DEC (problématique 3D et détection de la neige), nous allons analyser la fiabilité du capteur, la précision des méthodes mises au point, leurs incertitudes, de manière à définir notre gamme d'utilisation.

7.4. UTILISATION D'UN RÉSEAU DE NEURONES :

Chapitre 8:

Cartographie finale : Fiabilité, Précision et incertitudes :

Sommaire du Chapitre:

8.1 Création des cartes d'enneigement :	203
8.2 Fiabilité du capteur :	203
8.3 Incertitudes du capteurs :	206
8.3.1 Incertitude spatiale du capteur SnoDEC :	206
8.3.2 Potentiel théorique de résolution du capteur	207
8.3.3 Incertitude graphique de la détection de la neige :	208
8.4 Fiabilité et performances des protocoles mis en place :	210
8.4.1 Sélection des images :	210
8.4.2 Fiabilité et statistiques d'acquisition :	212

Introduction du Chapitre 8 :

Les chapitres précédents ont montré comment il était possible de transformer une image 2D en cartographie 3D, et, de quelle manière on pouvait détecter automatiquement la neige sur les images. Maintenant que nous disposons de ces informations, nous allons pouvoir en réaliser la compilation, afin de mettre en place les cartographies d'enneigement.

Les appareils laissés à demeure sur le bassin versant sont soumis à des contraintes climatiques importantes. La clef du système étant l'obtention d'une image exploitable au minimum par jour, pour conserver une bonne résolution temporelle, nous devons d'analyser la fiabilité de nos installations sur la période de fonctionnement.

Les cartographies que nous allons obtenir sont appelées à être utilisées dans le cadre de modélisations nivologiques et hydrologiques. Dans ce contexte, il est souhaitable d'introduire le moins d'erreurs possibles dans les données. La gestion de ces erreurs passe par la connaissance des incertitudes du système, au regard de la résolution spatiale et de la détection de la neige.

CHAPITRE 8. CARTOGRAPHIE FINALE : FIABILITÉ, PRÉCISION ET INCERTITUDES :

Section 8.1

Création des cartes d'enneigement :

Au cours des précédentes parties, nous avons discuté des techniques nous permettant de transformer les images en 2 dimensions en une représentation 3D, et, de là, de détecter la neige sur les images. Ces différentes techniques indépendantes ont été automatisées. Il est dès lors possible de réaliser ce travail pour l'ensemble de notre base de données. Cependant, ces deux informations nécessitent une mise en commun, afin d'obtenir la carte du manteau neigeux sur le versant.

Lorsque l'on dispose des informations sur la 3D et l'enneigement, il est assez simple de passer de l'un à l'autre, et de créer la carte d'enneigement. Au cours de l'étape de calcul des transformations 3D, on a déterminé une table de passage permettant d'associer à chaque pixel MNT les pixels images qu'il recouvrait, et inversement. La table de passage permet donc de connaître pour un pixel MNT donné la liste des pixels images correspondant. La détection de la neige nous donne pour chaque pixel image son état pour l'analyse en cours. Ainsi, on va simplement regarder dans un pixel MNT si il renferme une majorité de pixels enneigés ou non, et en déduire son état de surface. Ces manipulations sont très simples, et utilisent une table de correspondance qui est en réalité le fichier de sortie du logiciel de calibration. Un rapide traitement informatique nécessitant peu de temps de calcul, une fois les calibrations effectuées nous donne donc la carte de l'enneigement sur le versant.

Par la suite, nous verrons que compte tenu de la quantité d'images à traiter, cette étape de compilation des informations a été automatisée et peut être lancée en série sur de grande base de données, y compris à partir d'un serveur externe.

Les figures 8.1 et 8.2 présentent quelques résultats sur le bassin versant du Vorz pour les deux sites étudiés. Les exemples sont pris pour des mois hivernaux, où la quasi totalité des surfaces visibles est enneigée, et, pour des mois printanniers ou estivaux durant lesquels la couverture neigeuse fond progressivement. Cette période est celle nous apportant le plus d'informations puisqu'on y observe des variations de surface, contrairement à l'hiver où l'inaccessibilité des hauteurs de neige ne nous permet pas de disposer d'informations plus conséquentes que la présence ou non de neige. Il est à noter que lors de la période de fonte, il est courant d'observer la fonte quasiment pixel par pixel et de pouvoir quantifier le recul du manteau neigeux à l'intérieur d'une même journée.

Section 8.2

Fiabilité du capteur :

La fiabilité du capteur SnoDECC est un facteur essentiel dans la réussite de notre travail puisqu'il détermine notre capacité future à pouvoir contraindre les modélisations nivologiques avec des pas temps suffisamment précis. Il était donc essentiel de mettre en place un système

8.2. FIABILITÉ DU CAPTEUR :

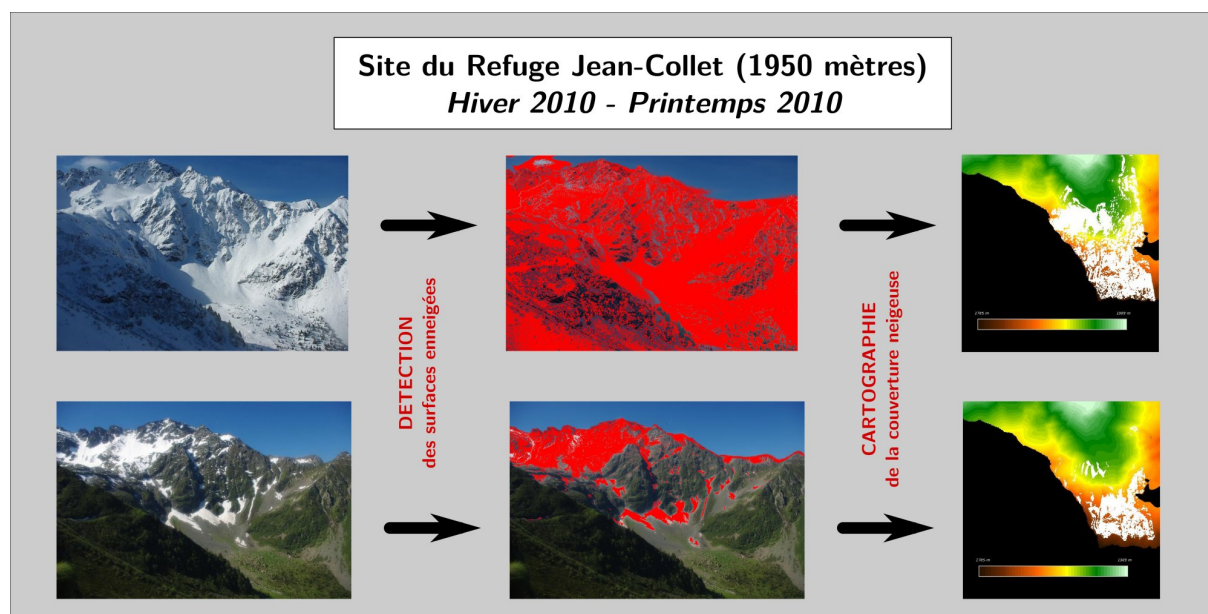


FIG. 8.1: Exemple de la cartographie de l'enneigement sur le site du Refuge Jean-Collet

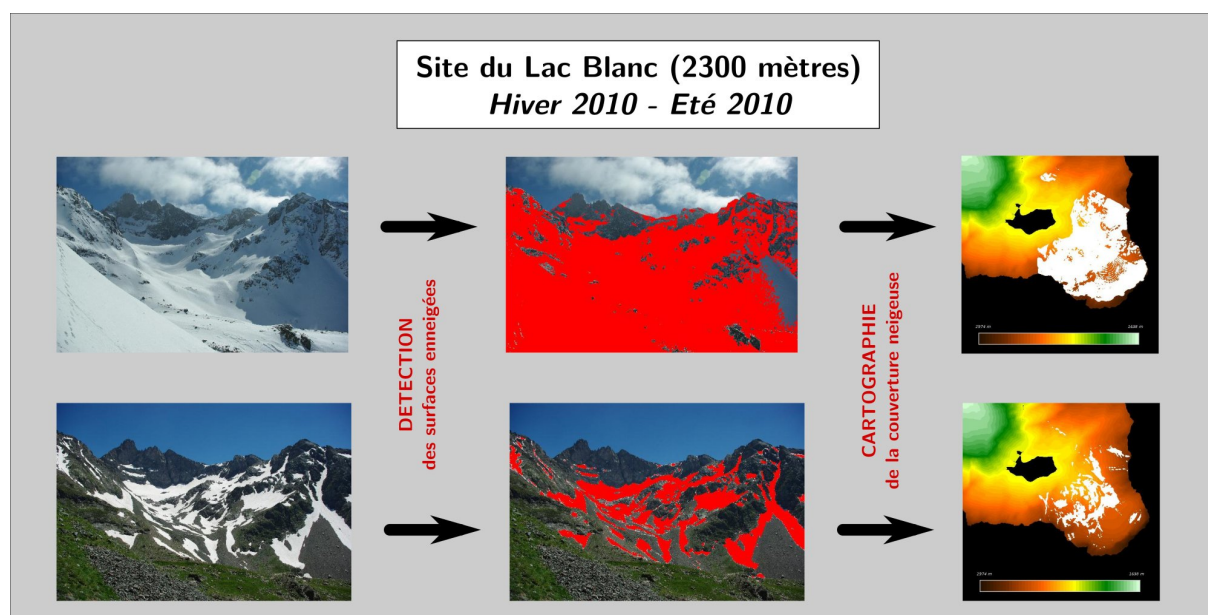


FIG. 8.2: Exemple de la cartographie de l'enneigement sur le site du Lac Blanc

autonome en énergie et résistant au froid et au gel pendant les mois d'hiver. L'objectif final était d'obtenir au moins une image exploitable par jour (sauf conditions météorologiques très défavorables), parmi les 5 ou 7 prises de vue, et dans le meilleur des cas, de pouvoir observer l'accumulation et la fonte au pas de temps infra-journalier.

A l'issue de près de deux années de mesures, nous pouvons tirer un premier bilan de fonctionnement du dispositif expérimental que nous avons installé sur le Vorz. La figure 8.3 présente les historiques d'enregistrements effectués en fonction des sites de mesures depuis le mois d'octobre 2009. Le premier constat est que en ce qui concerne le site du Lac Blanc, nous

CHAPITRE 8. CARTOGRAPHIE FINALE : FIABILITÉ, PRÉCISION ET INCERTITUDES :

n'avons eu aucun problème d'acquisition et l'ensemble des images potentielles a été enregistré. En revanche sur le site du refuge Jean-Collet, des manques ponctuels ont été relevés. Ceux-ci correspondent à la période hivernale, ce qui laisse à penser que le froid joue probablement un rôle dans ces problèmes techniques d'acquisition des données.

Du point de vue du stockage des données, il n'y a eu à aucun moment dépassement de

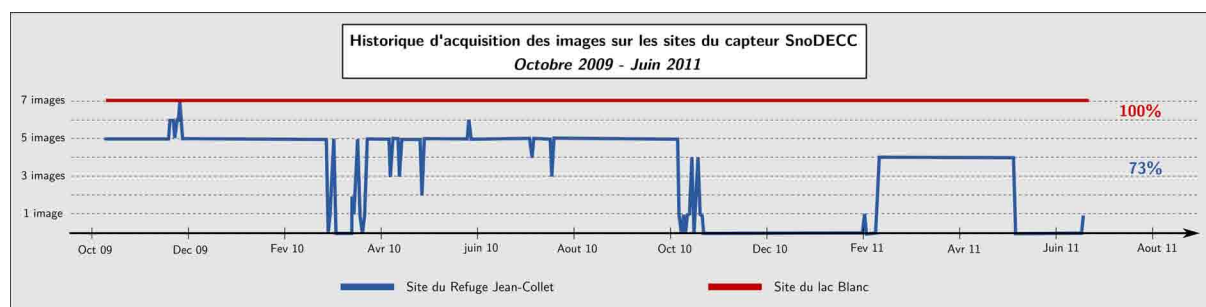


FIG. 8.3: Historique du fonctionnement du capteur SnoDECC

la capacité mémoire (8 mois d'autonomie avec des cartes SD de 8Go), et, aucun problème d'enregistrement depuis l'appareil photographique.

La qualité des images ne s'est pas dégradée au cours de la période d'étude, et les seules gênes relevées sont issues de problèmes d'humidité générant de la condensation au niveau de l'appareil du refuge, tandis qu'il n'y a rien à signaler au Lac Blanc. Ce problème a été résolu facilement en renforçant le système anti-humidité déjà en place, ainsi que l'étanchéité du boîtier de protection.

A première vue, il n'y a pas eu d'incident au niveau des panneaux solaires, et, bien que le placage de neige soit possible en cas de grosse perturbation, celle-ci fond rapidement au niveau du Lac Blanc, qui est bien exposé au sud sur des rochers clairs, et dans une moindre mesure, le phénomène est semblable au Refuge.

Les problèmes d'acquisition semblent donc provenir des batteries, ou du moins de leur réalimentation en énergie par le panneau solaire. Après analyse du problème, il est apparu qu'un système de blocage de l'alimentation de la batterie par le panneau solaire se déclenche en deçà de 0°C , provoquant donc une perte d'énergie importante, et donc une décharge rapide de la batterie. Après avoir constaté ce problème, il a été décidé de mettre en place un nouveau système de batterie plus traditionnel (actuellement, batterie Lithium-ion), et de changer le système d'alimentation par le panneau sur le site du Refuge.

En définitive l'objectif initial a été largement rempli pour le site du Lac Blanc. En revanche au niveau du Refuge, on est en présence de manques importants dans la chronique. Malgré tout, au cours des deux saisons passées, nous avons la chance d'avoir réussi à enregistrer les périodes clés du cycle nivologique, à savoir la fonte et l'accumulation, ce qui limite l'impact des dysfonctionnements du système.

Incertitudes du capteurs :

Un des facteurs importants dans la limitation de l'utilisation du capteur que nous avons développé est son incertitude, notamment vis-à-vis de la résolution spatiale des cartographies et de la qualité de la détection de la neige. Dans notre travail futur, nous allons travailler sur des grilles MNT de quelques mètres de résolution (de 5 à 30 mètres), il convient donc d'avoir une résolution adaptée au niveau des sorties cartographiques du capteur. De même, si la détection automatique de la neige n'est pas fiable, nous allons introduire un biais conséquent dans l'estimation du manteau neigeux, d'autant plus que ces cartes serviront de référence et de contrainte au futur modèle hydrologique du bassin versant.

8.3.1 Incertitude spatiale du capteur SnoDEC :

L'incertitude spatiale du capteur SnoDECC peut être déterminée par un mécanisme très simple. Dans un premier temps, on connaît la fonction de transfert entre les données 3D et 2D, et, dans un second temps, les coordonnées de certains points caractéristiques du relief (sommet, cols,...). Pour déterminer les décalages entre la réalité et notre méthode de calcul, il suffit de calculer avec les coordonnées images de points connus, leur projection dans la scène 3D. Ces positions seront alors comparées aux valeurs de ces points sur le MNT, donnant ainsi le décalage spatial entre le capteur et la réalité.

8.3.1.1 Incertitude planimétrique :

Comme on l'a dit précédemment, un des grands challenges de la mise au point de la routine 3D a été de limiter les effets d'une prise de vue plongeante, voir rasante dans certains cas, qui entraîne de grandes incertitudes de projection, contrairement à une vue perpendiculaire classique (comme en photogrammétrie). Ce phénomène est susceptible dans notre cas d'impacter de manière importante l'estimation de la position des surfaces situées dans certaines zones, dont l'orientation par rapport à la caméra est assez loin de la perpendiculaire, comme c'est le cas pour les replats et faibles pentes.

8.3.1.2 Incertitude altimétrique :

Les erreurs commises sur l'estimation de l'altitude sont essentiellement issues de la résolution du MNT utilisé pour réaliser la calibration initiale. Ainsi, dans notre cas, nous avons utilisé un MNT de 30 mètres de résolution et interpolé à 5 mètres (ajout de points de contrôle), avec une résolution altimétrique de 1 mètre. Dans ce contexte, il est illusoire de vouloir obtenir des précisions très inférieures au mètre, du moins en altitude. Pour les prochaines opérations, un MNT à haute résolution a été acquis par le laboratoire et devrait considérablement réduire les marges d'erreurs sur les résolutions altimétriques, mais également planimétriques. En effet, il devrait permettre un calage plus précis et un meilleur calcul de la MTG, grâce à sa résolution X,Y de l'ordre de 3 mètres et de 50 centimètre en Z.

8.3.1.3 Incertitude générale :

En conséquence, il apparaît que les incertitudes sur la résolution spatiale du système sont essentiellement dues à la qualité de la calibration initiale, et la précision du MNT utilisé. Pour

CHAPITRE 8. CARTOGRAPHIE FINALE : FIABILITÉ, PRÉCISION ET INCERTITUDES :

calculer cette résolution, nous nous sommes appuyés sur les points susceptibles d'être les plus impactés, à savoir ceux situés le plus au fond de la prise de vue, c'est-à-dire les sommets et cols de l'arrière plan de l'image. Les résultats obtenus sur les incertitudes sont satisfaisants.

Pour le site du lac blanc, l'erreur générale commise sur les pixels lointains est de 10 mètre pour une distance d'approximativement 2 kilomètres. Il en découle que la résolution est de $0,5m/100m$, ainsi, à chaque fois que l'on s'éloigne de l'appareil de 100 mètres, on perd en moyenne 0,5 mètres de résolution. Ce phénomène est lié en grande partie au fait que la résolution de l'appareil photographique décroît avec la distance.

Pour le site du Refuge Jean collet, l'erreur générale sur les sommets du versants opposés est de 50 mètres pour 1,75 kilomètres de distance. De fait, la résolution générale de la carte finale sera de $2,85m/100m$. Ce site possède une résolution plus faible, notamment en raison de la présence de surfaces assez planes en fond de vallon et d'une vue relativement plus plongeante que pour le site précédent.

En conclusion, la résolution générale obtenue pour le capteur SnoDECC est voisine du mètre. Or, lors des modélisations nivologiques et hydrologiques, nous allons bien plus souvent travailler sur des grilles de 10 à 50 mètres de résolution. En conséquence les résultats obtenus sont largement suffisants pour limiter considérablement l'introduction d'erreurs liées au positionnement géométrique et géographique de la scène. Les données du capteur pourront donc parfaitement du point de vue de la résolution spatiale, être utilisées dans nos modélisations.

8.3.2 Potentiel théorique de résolution du capteur

8.3.2.1 Qualité des images :

Un élément du dispositif est susceptible d'entraîner la présence d'une incertitude importante dans les résultats du traitement 3D des images, il s'agit de la résolution des photographies issues de l'appareil en place sur le terrain. En effet, cette résolution bien que fixée par les caractéristiques de l'appareil dépend de la distance à laquelle on se trouve de celui-ci. Ainsi, dans les images, la partie située au premier plan sera bien souvent observable avec une résolution de quelques millimètres (brin d'herbes, petits cailloux,...). Cependant, lorsque l'on va s'éloigner du point de prise de vue, cette résolution va progressivement se détériorer. Sur le site du lac Blanc par exemple, le totalisateur, observable sur l'image et mesurant 3 mètres, est représenté par une vingtaine de pixel sur l'image de sortie ; tandis que les sommets de l'arrière plan sont parfois "grossièrement représentés" avec des pointes terminales de un ou deux pixels de large. L'ensemble de ces changements entraîne une dégradation importante de la résolution géométrique, avant même d'avoir initié la phase de calibration.

Les alternatives à ce problème ne sont malheureusement pas nombreuses, puisque la seule solution est d'investir dans des appareils à plus haute résolution, qui même eux ne seront pas capables de nous donner des résolutions satisfaisantes, pour par exemple étudier les variations d'épaisseurs du manteau neigeux au centimètre près sur la partie terminale du bassin versant.

8.3.2.2 Cartes de résolution théorique :

Dans l'optique de mieux quantifier les résolutions potentielles sur notre versant, nous avons calculé pour chaque point de celui-ci, en fonction des caractéristiques de l'appareil en place, quelle était la résolution théorique. Les cartes de résolutions sont présentées sur la figure 8.4 et permettent de se rendre compte de l'efficacité potentielle du système en terme de détection

8.3. INCERTITUDES DU CAPTEURS :

de surfaces enneigées, mais, de sa relative inefficacité en ce qui concerne le travail sur les épaisseurs du manteau neigeux, du moins à longue distance.

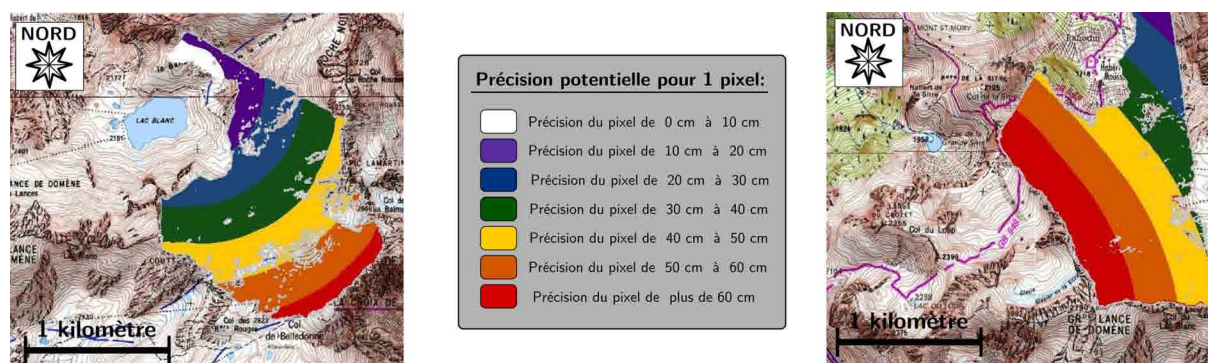


FIG. 8.4: Cartes des résolutions spatiales théoriques du système SnoDEC sur les sites du Vorz

8.3.3 Incertitude graphique de la détection de la neige :

La deuxième grande incertitude sur les cartographies d'enneigement est liée à l'efficacité de la détection des zones enneigées sur les images prises par les appareils. Leur quantification est de fait essentielle pour valider leur possibilité d'utilisation dans le cadre de nos modélisations. Il est en effet, inenvisageable d'introduire des erreurs importantes, compte tenu du fait que ces données serviront à contraindre les sorties finales du modèle nivologique, qui constitue le maillon clef de notre modèle hydrologique global sur le versant.

8.3.3.1 Données de calibration :

Lors de mise en place de l'algorithme de détection, un échantillon d'image limité a été utilisé. Ces images ont été choisies du fait de leur particularité d'éclairage ou de couverture nuageuse, de manière à refléter le plus grand nombre possible de situations sur le bassin versant. Au total, cet échantillon comprenait 30 images sur lesquelles nous avons mené la calibration. A l'issue de l'étape de calibration, nous nous devons de valider celle-ci par un test. Pour cela, nous avons réalisé une détection manuelle précise sur ces 30 images, afin de détecter de manière indiscutable l'ensemble des pixels neige. Cette détection manuelle a ensuite été comparée aux résultats de la détection automatique. Il en ressort que le taux de réussite de notre algorithme est de plus de 80% de succès sur cet ensemble d'images particulièrement difficile à traiter.

Ce taux de réussite paraît satisfaisant, car on peut s'attendre à des améliorations notables lorsque les images les moins utilisables seront filtrées automatiquement. Ainsi ce taux semble être un minima. Cependant, il convient maintenant de regarder quels sont les résultats sur un échantillon de validation.

8.3.3.2 Données de validation :

Afin de rendre les résultats les plus précis possibles, nous avons travaillé à la construction d'un échantillon de validation très conséquent de près de 120 images réparties tout au long de la saison et dont les conditions d'acquisition étaient donc très variées. Nous avons alors entrepris une détection manuelle des pixels neige sur chacune des images. Comme précédemment, les résultats ont été comparés à ceux obtenus par l'algorithme automatique et sont présentés dans

CHAPITRE 8. CARTOGRAPHIE FINALE : FIABILITÉ, PRÉCISION ET INCERTITUDES :

le tableau 8.1.

Détection de la neige situations & performances		
	Détection de neige	Pas de détection de neige
Neige dans la réalité	30,7%	11,8%
Pas de Neige dans la réalité	14,7%	42,8%

TAB. 8.1: Tableau des taux de détection détaillés du capteur

Au final, il est donc possible d'évaluer la qualité générale de la détection automatique des pixels enneigés. Il apparaît au vu des résultats (cf tableau 8.2) ; que ces détections et donc nos cartographies peuvent être utilisées de manière régulière dans nos modèles. De plus, il est important de noter que l'ensemble des opérations d'évaluation de la qualité des détections a été effectué sur la totalité des images disponibles, or, nous allons dans les paragraphes suivants montrer que toutes les images ne seront pas utilisées puisqu'un filtre automatique sera développé et permettra de ne sélectionner que les images présentant des caractéristiques satisfaisantes pour une détection correcte.

Qualité de la détection de neige	
Taux moyen de réussite	73,5%
Taux de réussite maximum	99,2%
Taux de réussite minimum	46,1%
Taux inférieur à 66%	25,8%

TAB. 8.2: Tableau des performances générales du système SnoDECC

Section 8.4

Fiabilité et performances des protocoles mis en place :

La fiabilité du capteur est un élément essentiel, le but étant d'enregistrer au moins une image par jour exploitable, mis à part des conditions météorologiques trop contraignantes. Cette fiabilité repose sur deux points essentiels : une bonne acquisition des images, et, un processus de sélection efficace, permettant d'éliminer les images inutilisables perturbant la qualité de la détection automatique.

8.4.1 Sélection des images :

Le capteur SnoDECC a passé deux hivers en fonction sur le terrain, il est donc nécessaire de dresser un premier bilan de son fonctionnement. Comme nous l'avons vu dans la première partie, nous avons rencontré quelques problèmes d'acquisition pour la caméra du Refuge Jean-Collet. Pour le Lac Blanc en revanche, aucun problème n'a été observé. Cependant, l'acquisition des images n'est que la première étape du processus, et nous avons montré que l'utilisation d'images de bonnes qualités permet d'augmenter considérablement le taux de réussite de la cartographie. Nous avons donc mis au point un algorithme de tri automatique des images permettant de ne travailler que sur des photographies où nous sommes assurés de réaliser une détection de l'enneigement correct. En réalité, nous réalisons la détection sur l'ensemble des images, mais, nous ne conservons dans un premier temps que les meilleures images de chaque journée.

Ce tri automatique est donc réalisé en analysant les caractéristiques colorimétriques de chaque image, afin d'en déduire l'utilisabilité. Pour cela, nous nous basons sur deux critères que nous allons présenter.

8.4.1.1 Analyse de la luminosité :

Comme on l'a vu, la luminosité joue un rôle majeur dans la détection de la neige, mais, la variation colorimétrique est également importante. En effet, plus les contrastes dans l'image seront importants, plus la neige sera mise en évidence par rapport aux autres couleurs et plus la détection sera efficace. Ainsi, nous avons mis au point un indice permettant de juger à la fois de la qualité de la luminosité, et, du contraste dans l'image. Pour cela, on calcule l'écart-type de chaque canal R, G et B sur l'ensemble des pixels de l'image. Plus cet écart est fort, plus les couleurs sont contrastées, et plus la luminosité est forte ; au contraire, en cas de faible écart, nous sommes en présence d'une image sur laquelle la luminosité est peu importante et les couleurs varient peu, typiquement une image prise par temps de brouillard. Cette technique nous permet donc en première approche de juger de la possibilité d'une détection efficace ou non.

8.4.1.2 Calcul du taux de confiance :

Dans un second temps, une fois la colorimétrie quantifiée, on s'intéresse au facteur limitant principal de la détection automatique : la couverture nuageuse. Pour cela, nous disposons de points de référence dans la scène, et, sur chaque image un algorithme de reconnaissance permet de juger de la visibilité des points de contrôle. Ces points sont répartis sur l'ensemble de l'image et plus particulièrement sur les zones rocheuses de l'arrière plan de la photographie.

CHAPITRE 8. CARTOGRAPHIE FINALE : FIABILITÉ, PRÉCISION ET INCERTITUDES :

Au final, leur quantité visible sur l'image nous permet de quantifier la présence ou non d'une couverture nuageuse, et donc, de juger de l'utilisabilité de l'image.

8.4.1.3 Exemple d'une sélection d'image :

A partir des deux techniques précédentes, nous effectuons la sélection pour chaque journée de la meilleure image dont nous disposons pour la détection automatique. Chaque technique conduit à la mise en place de deux indices : un indice colorimétrique et un taux de confiance d'utilisation de l'image. La combinaison de ces deux indices détermine automatiquement la meilleure image à utiliser pour la détection de la neige. La figure 8.5 présente un exemple concret de ce travail sur le site du Lac Blanc.

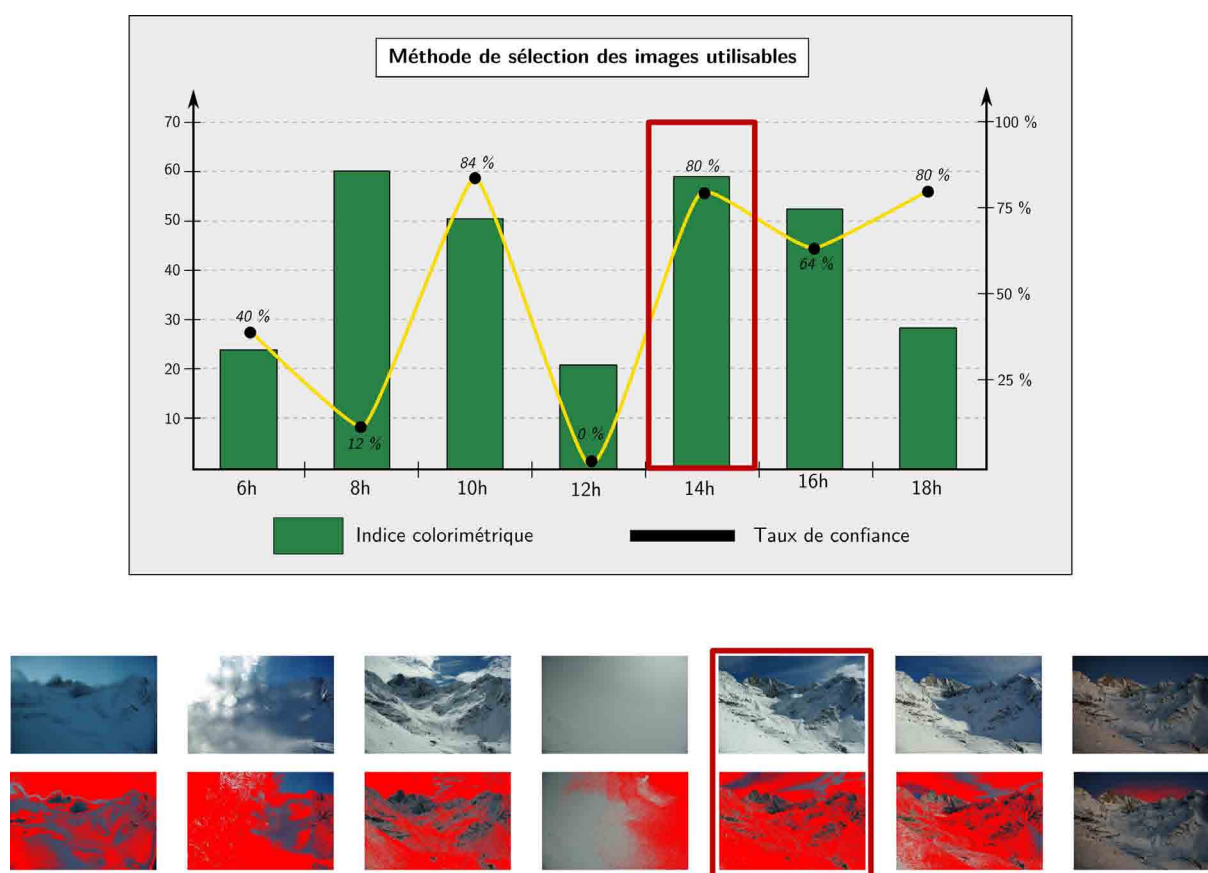


FIG. 8.5: processus de sélection automatique des meilleures images journalières

Dans l'exemple, on analyse une journée hivernale pour laquelle 7 images sont disponibles dans la base de données. Le premier indice montre des variations importantes de la colorimétrie, qui sont confirmées par l'analyse des images. Les images possédant les contrastes les plus importants sont celles prises durant les heures de la journée où le soleil est présent, tandis que lorsqu'il n'est pas encore levé ou masqué par les nuages (image 4), les valeurs de l'indice sont faibles. On peut remarquer que 4 images semblent être exploitables, à l'exception de celle sur laquelle de la brume est présente.

Le second indicateur permettant de juger de la confiance que l'on peut accorder à l'image en fonction de la visibilité nous permet d'éliminer l'image sur laquelle la brume est présente. Il reste donc 3 images a priori exploitables. Parmi elles, le choix se fait sur les valeurs des critères qui

8.4. FIABILITÉ ET PERFORMANCES DES PROTOCOLES MIS EN PLACE :

doivent être maximum. Au final, c'est l'image 5 prise à 14h qui est retenue pour cette journée. L'analyse des images de détection valide le choix effectué par l'algorithme automatique puisqu'un contrôle visuel attentif permet de constater que la détection automatique est très correcte sur cette image.

8.4.2 Fiabilité et statistiques d'acquisition :

Comme cela a été mis en avant dans les parties précédentes, les appareils ont présenté des taux d'enregistrements différents, même si celui du Lac Blanc a fonctionné à 100% depuis octobre 2009. Malgré tout, il faut rappeler que l'objectif était d'obtenir au moins une image journalière exploitable, et donc une carte d'enneigement, par jour au minimum, afin de conserver un échantillonnage temporel satisfaisant. Ainsi, nous allons donc commencer par analyser le fonctionnement sur les deux premières années de mesure.

8.4.2.1 Taux d'enregistrements sur le Vorz :

Même si on a déjà présenté le graphique des enregistrements effectués au cours de la saison, nous allons maintenant chiffrer ces taux de manière plus précise. Ainsi, depuis octobre 2009, les appareils sont en fonction sur le bassin et ont été relevés pour la dernière fois en juin 2011. Au total, nous disposons donc d'une période d'enregistrement continue de 624 jours. La programmation des "timers" des appareils photographiques a été effectuée de manière à enregistrer 7 images par jour au Lac Blanc, et 5 au Refuge Jean-Collet, entre 7h et 19h. Les performances de fonctionnement sont présentées dans le tableau 8.3.

Performances des capteurs SnoDEC sur le terrain				
Site	Période	Nb Images théorique	Nb Images enregistrées	Performance
Lac Blanc	625 jours	4375 images	4375 images	100%
Refuge	625 jours	3125 images	2102 images	67,25%

TAB. 8.3: Taux d'enregistrements des capteurs SnoDECC sur le Vorz

les valeurs présentées dans ce tableau confirment les résultats que nous avons entrevus. De plus, elles mettent en évidence la nécessité de développer des méthodes de traitement automatique, car avec plus de 5000 images à traiter, il est impossible de réaliser ce travail manuellement. Parmi l'ensemble de ces images, certaines ne seront pas exploitables pour différentes raisons : prise de vue nocturne (7h et 19h en hiver), brume, mauvais temps,... Il s'agit donc de quantifier le nombre d'images inexploitables, ainsi que les pertes d'échantillonnage qu'elles représentent.

8.4.2.2 Périodes de "gap" dans les données :

Le traitement de l'ensemble de la base de données a été réalisé à l'aide d'un outil informatique développé spécifiquement pour ce travail. Outre le travail sur l'intégralité de la base et la création des cartes d'enneigement automatiquement, cet outil permet également de déterminer pour chaque journée quelles sont les images utilisables à l'aide de la méthode vue précédemment. Au terme de ce traitement, l'intégralité des images ne donne pas forcément accès à une carte d'enneigement, comme par exemple si les conditions météorologiques sont trop mauvaises. Ainsi, il va exister dans la chroniques des périodes durant lesquelles on va manquer de données. L'estimation de la durée et de la fréquence de ces périodes est très importante, car elle permet de connaître la capacité du capteur à faire face à des situations

CHAPITRE 8. CARTOGRAPHIE FINALE : FIABILITÉ, PRÉCISION ET INCERTITUDES :

difficiles. Cette estimation a été effectuée pour le capteur du Lac Blanc sur laquelle nous avons des taux de réussites excellents. Nous avons donc déterminé les périodes de temps pendant lesquelles nous étions susceptibles d'avoir un manque de données, ainsi que la fréquence à laquelle ils se produisent durant la période d'acquisition.

Sur l'ensemble de la période, le nombre de jour pour lesquels on ne dispose pas d'images est d'environ 30% sur le site du Lac Blanc. Ces manques sont essentiellement dus à des conditions météorologiques défavorables et ne peuvent donc être rattrapés par aucun mécanisme, et, ne peuvent faire l'objet d'aucune autre mesure, même par des techniques alternatives (satellite,...). On peut également considérer que lors de ces périodes, le mauvais temps ne change pas fondamentalement les conditions en terme de fonte, et on est essentiellement confronté à des phénomènes d'accumulation de neige, que l'on peut quantifier aisément par la suite. Dans ces conditions, le manque d'informations devient problématique lorsque les mauvaises conditions perdurent durant plusieurs jours. Le tableau 8.4 met en évidence ces problèmes.

Périodes de manques de données	
<i>Durée du "Gap"</i>	<i>Nombre d'occurrences observées</i>
3 jours consécutifs	15 périodes
4 jours consécutifs	8 périodes
5 jours consécutifs	4 périodes
6 jours consécutifs	1 période

TAB. 8.4: Fréquence et durée des manques d'images utilisables pour des raisons climatiques (fortes perturbations, brouillard,...)

Ce tableau met en évidence l'existence d'un faible nombre de longues durées de mauvais temps et donc de perte de représentativité temporelle du capteur. Seule une période est supérieure à 5 jours de non enregistrement, et 15 périodes de 3 jours consécutifs de non création de données utilisables sont relevées. Le tri effectué étant automatique, il est possible en cas de nécessité absolue de reprendre pour ces périodes un tri manuel, et de vérifier que les images sont réellement inexploitable. C'est pourquoi, ces taux sont des minima et il est évident que ces gaps ne seront finalement pas aussi importants que ceux décrits dans le tableau 8.4.

En conclusion, l'outil développé a une bonne résolution temporelle, répondant aux contraintes posées à l'initiation du travail. En tous les cas, on dispose ici, d'un outil qui possède une résolution temporelle bien supérieure à toutes les autres techniques existantes (satellites, mesures de terrain,...), puisque l'on atteint des résolutions journalières et dans bien des cas, plusieurs images étant exploitables chaque jour, on peut atteindre des résolutions infra-journalières de l'ordre de 2 à 3 heures, permettant ainsi d'observer la fonte et l'accumulation éventuelle en quasi temps réel.

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 8 :

Ce chapitre nous a permis de préciser comment était effectuée la mise en commun des transformations 3D et des détections de neige pour une image donnée. On obtient une cartographie 3D liée à une image d'enneigement, comme cela est souhaité pour le système SnoDEC. Un fois cette tâche effectuée, on a montré par une analyse historique que le fonctionnement du système était en grande partie lié à la possibilité d'alimentation par l'intermédiaire de panneaux solaires. Ce dispositif a bien fonctionné sur le bassin du Vorz, et a permis d'obtenir des taux de réussites très conséquents :

- 100% de réussite sur le site du lac Blanc*
- 75 % de réussite sur le site du Refuge*
- Plus de 4000 images à analyser par saison*

En ce qui concerne la résolution spatiale du système, des cartes précises du potentiel de résolution peuvent être réalisées et montrent des possibilités de précision variant de quelques centimètres à environ 1 mètre. Des valeurs plus précises ont été calculées à partir des calibrations effectuées, et, il en ressort que le système est relativement précis :

- 10 mètres d'erreur pour 2 kilomètres de distance sur le site du lac Blanc (moins de 1%)*
- 50 mètres d'erreur pour 2 kilomètres de distance sur le site du Refuge (environ 2%)*
- Précision globale de l'ordre de la dizaine de mètre*

Ces précisions sont tout à fait adaptées aux grilles couramment utilisées en hydrologie, souvent voisine de la dizaine de mètres.

Au niveau des précisions de la détection des surfaces enneigées, les résultats sont tout à fait satisfaisants, puisque dans plus de 75% des cas on obtient une détection fiable de la neige. Ainsi, l'objectif d'obtenir au moins une image exploitable par jour sera parfaitement atteignable. Tout en conservant à l'esprit que les données sont à prendre en complément de leur incertitudes, nous allons maintenant analyser notre base de donnée, et étudier l'évolution de la couverture neigeuse pour les deux saisons passées.

Chapitre 9:

Création des cartes de couverture neigeuse :

Sommaire du Chapitre:

9.1 Evolution de la couverture nivale sur le bassin versant :	217
9.1.1 Evolution de la couverture neigeuse sur le bassin versant Vorz :	217
9.1.2 Cartographie de l'enneigement :	220
9.2 Analyse des paramètres spécifiques aux modalités de fonte & accumulation :	223
9.2.1 L'altitude :	223
9.2.2 L'exposition :	224
9.2.3 Altitude et exposition :	225
9.2.4 La pente :	226
9.3 Informations spatiales et temporelles sur l'évolution du manteau neigeux :	227
9.3.1 Evolution mensuelle de l'enneigement sur le bassin versant du Vorz :	228
9.3.2 Evolution mensuelle de l'enneigement sur le bassin versant du Vorz en fonction de l'altitude et de l'exposition :	231

Introduction du Chapitre 9 :

La base de données d'images du Vorz comprend plus de 4000 images par site, sur les deux ans d'exploitation. L'ensemble du traitement des images a été réalisé de manière automatique et permet de disposer des cartes d'enneigement depuis le mois d'octobre 2009. Ces cartes présentent une très bonne résolution spatiale et couvrent des échelles de temps infra-journalières. L'objectif de leur analyse est de mieux comprendre les processus nivologiques se produisant sur le bassin versant, et notamment, l'évolution de la couverture neigeuse au cours de l'année et ses modalités de fonte (vitesse, disparité,...).

Afin d'étudier ces phénomènes, diverses analyses ont été menées sur les cartographies. Nous avons notamment analysé l'importance des paramètres hydrométéorologiques majeurs en montagne : l'altitude, l'exposition, ou encore la pente. Ces séries d'images pourront être exploitées par la suite pour la contrainte des modèles nivologiques.

Dans une premier temps, nous allons étudier comment se comporte le manteau neigeux depuis 2 saisons sur le bassin versant, en particulier quelle importance il occupe durant une année hydrologique. Ensuite, nous verrons comment il est possible d'utiliser ces cartes pour en extraire des informations relatives à l'altitude ou l'exposition en établissant des classes de pixels spécifiques. Enfin, à partir de plusieurs séries d'images, et de différents type de sélections d'informations, nous étudierons la variabilité spatiale du manteau neigeux sur le bassin versant du Vorz.

CHAPITRE 9. CRÉATION DES CARTES DE COUVERTURE NEIGEUSE :

Section 9.1

Evolution de la couverture nivale sur le bassin versant :

Les chapitres précédents ont décrit le protocole ainsi que les modalités de fonctionnement du capteur SnoDEC et ses capacités de mesures. L'objet de ce chapitre est de présenter les performances réelles du capteurs sur le terrain, ainsi que les possibilités qu'il apporte en terme d'informations spatiales et temporelles sur l'évolution du manteau neigeux.

9.1.1 Evolution de la couverture neigeuse sur le bassin versant Vorz :

La base de données dont nous disposons nous permet de calculer pour chaque jour (en réalité pour chaque image exploitable) une cartographie de l'enneigement précise. A partir de celle-ci, il est possible de calculer la surface visible du bassin versant qui est enneigée. Cette surface enneigée varie au cours de la saison, et nous disposons donc de son enregistrement. Cette opération a été réalisée sur les deux sites du Lac Blanc et du Refuge.

9.1.1.1 Site du Refuge :

En observant la morphologie des zones ciblées par l'appareil photographique, on constate qu'elles recouvrent pour l'essentiel des surfaces relativement peu pentées, puisque seule la partie supérieure du bassin possède des surface proches de la verticale sur lesquelles la neige ne peut s'accumuler, les taux d'enneigement seront donc assez fort au coeur de l'hiver. De plus, l'orientation générale est nord-est avec un fort encaissement des zones basses, ce qui fait que cette zone restera enneigée relativement longtemps durant la saison. Le graphique suivant (fig. 9.1) montre l'évolution des surfaces enneigées depuis octobre 2009.

9.1. EVOLUTION DE LA COUVERTURE NIVALE SUR LE BASSIN VERSANT :

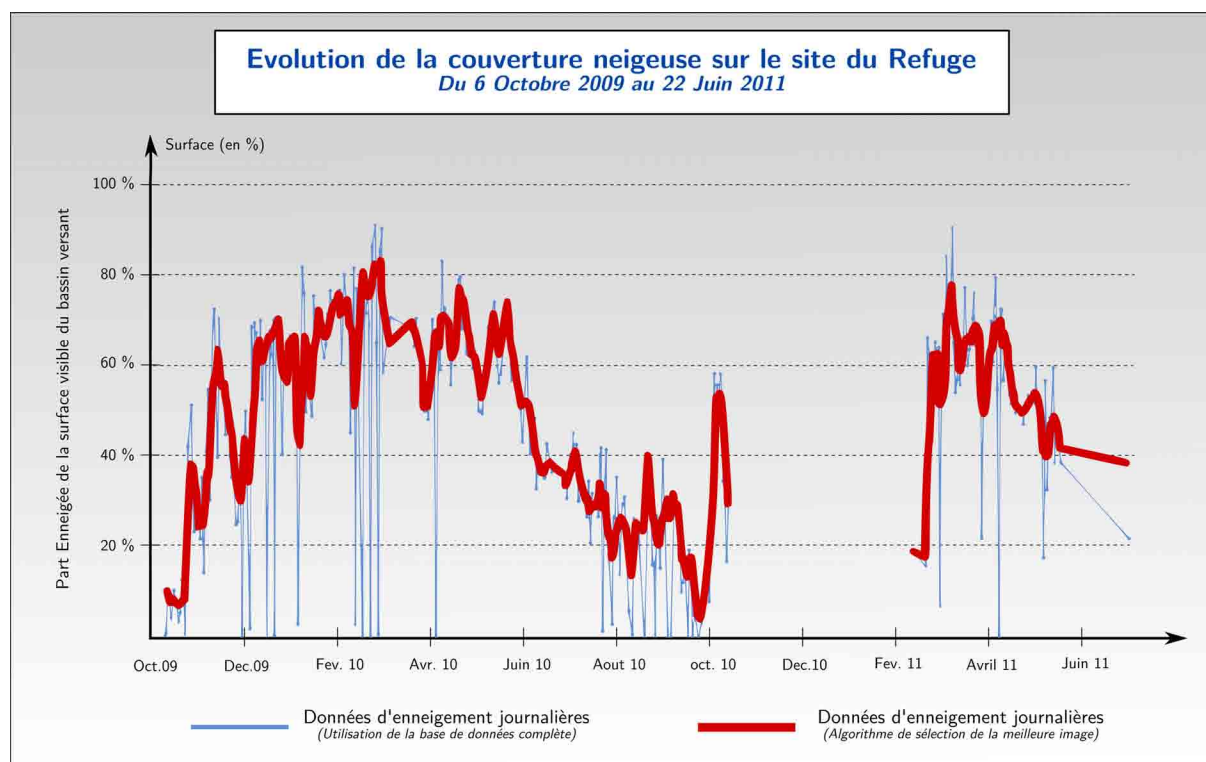


FIG. 9.1: Evolution de l'enneigement (en proportion de la surface visible) sur le site du Lac Blanc entre octobre 2009 et juin 2011

Comme on l'a dit précédemment, l'appareil du refuge a présenté quelques défauts de fonctionnement, et, il existe quelques périodes durant lesquelles nous ne disposons pas de données (novembre 2010 à février 2011). La courbe bleue correspond aux enregistrements bruts de toutes les images, c'est-à-dire sans se préoccuper de leur exploitabilité. En rouge, on ne représente que les images sélectionnées et qui peuvent être exploitées. Ainsi, la courbe rouge représente l'évolution générale de l'enneigement au cours de la saison. On observe tout le long de cette courbe des oscillations importantes qui sont dues à l'alternance entre périodes de chute de neige et de fonte. Ces oscillations particulièrement remarquables dans la partie haute de la courbe résultent essentiellement du comportement des surfaces fortement pentées, qui ne permettent pas une accumulation de la neige qui soit s'accumule quelques temps jusqu'à se décrocher, soit fond rapidement en raison de l'albedo relativement fort des rochers environnants.

Globalement dans la zone, la neige commence à s'accumuler à partir du mois d'octobre, en fonction de la précocité des chutes de neige. L'évènement d'octobre 2010 est particulièrement marquant puisqu'on observe une forte augmentation, avec des chutes de neige probablement jusqu'au deux tiers du versant (soit environ 1700 mètres), suivie d'une fonte très rapide grâce à des conditions plus clémentes. Au cours de l'hiver, on atteint rapidement les valeurs maximales, avec des surfaces allant jusqu'à 80% d'enneigement du versant, les pentes raides ne permettant pas une accumulation efficace. La fonte nivale débute au mois de mars pour les deux saisons observées et se produit de manière assez rapide, en particulier du fait de la présence de zones planes, qui représentent une grande surface dans la partie basse du versant. Durant l'été, l'essentiel de la neige a fondu et on observe ponctuellement la présence de neige (10 à 20%) sur les parties hautes du versant qui se trouvent à environ 2500 mètres et sont donc potentiellement soumises aux chutes de neige même durant l'été.

CHAPITRE 9. CRÉATION DES CARTES DE COUVERTURE NEIGEUSE :

Ce graphe nous permet de mieux cerner le comportement du manteau neigeux sur la partie médiane du versant. D'après les caractéristiques de fonte, on peut s'attendre à une alimentation des torrents par l'eau de fusion dès le mois de mars, le phénomène se poursuivant de manière intense jusqu'au début du mois de juin.

9.1.1.2 Site du Lac Blanc :

Morphologiquement, la partie haute du bassin versant est différente de la zone du Refuge, on dispose ainsi d'une grande surface où la neige peut s'accumuler facilement, sur des pentes modérées et encaissées, surplombées par les sommets principaux du versant qui eux présentent des inclinaisons importantes, proches de la verticale, sur lesquelles la neige ne peut s'accumuler. Comme précédemment, ces zones seront à l'origine des oscillations de la partie supérieure de la courbe, avec des "purgés" de neige et des fontes rapides suivant les chutes importantes. Le graphe suivant (cf figure 9.2), comme pour le graphe précédent présente l'évolution de l'enneigement sur la partie visible depuis l'appareil du versant. La courbe bleue correspond à l'utilisation de la base de donnée complète, tandis que la courbe rouge ne prend en compte que les images sélectionnées automatiquement, dont on est sûr qu'elles sont exploitables (pas de couverture nuageuse, détection correcte,...).

Sur le site du Lac Blanc, on dispose d'une chronique complète qui nous permet d'observer

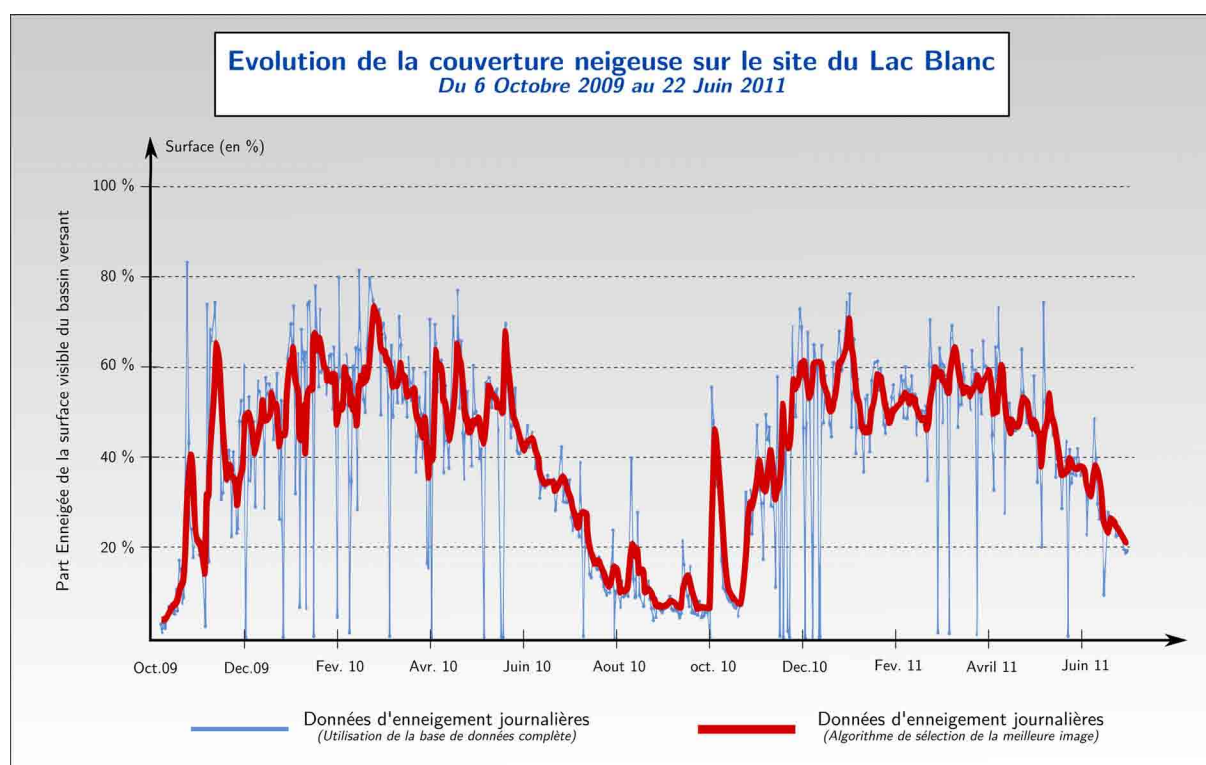


FIG. 9.2: Evolution de l'enneigement (en proportion de la surface visible) sur le site du Lac Blanc entre octobre 2009 et juin 2011

l'évolution d'une année sur l'autre et de mettre en évidence les différences entre les deux saisons passées, notamment sur les caractéristiques de la fonte. Le premier constat que l'on peut dresser à partir de ce graphe est que la période d'accumulation de la neige débute dès le début du mois d'octobre et se produit relativement soudainement. On passe ainsi rapidement d'une situation où le bassin versant est très peu enneigé à une couverture neigeuse conséquente. Ce

9.1. EVOLUTION DE LA COUVERTURE NIVALE SUR LE BASSIN VERSANT :

mécanisme s'explique en grande partie par l'altitude élevée de cette partie du bassin, supérieure à 2000 mètres pour l'intégralité de la surface visible. Ainsi, dès le début de l'automne, les précipitations se produisent sous forme de neige, ce qui n'est pas toujours le cas dans la partie basse. Au cours de l'hiver, les surfaces recouvertes par un manteau neigeux évoluent assez peu, mis à part le plaquage de neige sur les rochers à l'occasion d'épisodes conséquents, qui créent de petites oscillations. Au printemps, la fonte est logiquement plus tardive que dans la partie basse, puisqu'elle ne début que vers la mi-avril. Il est à noter que la différence entre les deux saisons est remarquable avec de plus faibles taux d'enneigement pour l'hiver 2010-2011 et une fonte plus précoce (mi-avril en 2011 contre fin-mai en 2010). La fin de la fonte intervient globalement courant juillet ou août, et vient donc alimenter abondamment jusqu'au moins au mois de juillet les débits du Vorz déjà alimentés par la partie centrale.

Une des particularités de cette partie du bassin, est la présence du glacier de Freydane. Ce glacier joue un rôle essentiel dans l'hydrologie, puisqu'il permet de maintenir des débits d'étiages conséquents sur le torrent du Vorz et d'alimenter le Lac Blanc tout au long de l'année. La trace du glacier est particulièrement observable pendant les mois de août et septembre, puisque les taux d'enneigement restent voisins de 10% pendant toute cette période. Contrairement à ce que l'on a observé sur la partie médiane, il peut exister des épisodes neigeux assez intenses au cours de la période estivale, que l'on repère sur des pics d'enneigement en juillet et août. Cette zone du bassin est donc soumise à l'influence de la neige et de sa fonte sur la totalité de l'année, en particulier en raison de son altitude supérieure à 2000 mètres.

La partie haute du bassin a donc un comportement différent de la partie médiane, ainsi, on passe d'un milieu de moyenne montagne à un comportement plutôt typique de la haute montagne. Ces conséquences nivologiques, ainsi que la présence du glacier (5-10% de la surface) vont donc jouer un rôle important dans le déroulement des processus hydrologiques.

9.1.2 Cartographie de l'enneigement :

Jusqu'à présent, nous n'avons travaillé que sur des données générales relatives à l'enneigement, mais par l'intermédiaire des cartes journalières, il est possible d'observer l'évolution de manière générale, mais également spatialement. Les cartes suivantes (cf figure 9.3) sont réalisées à partir de l'ensemble des données utilisables. Elles correspondent à la matérialisation sur le terrain des données de la courbe rouge des graphes précédents. Ainsi, pour chaque pixel MNT de 5 mètres de résolution, on calcul sur l'ensemble de la période d'étude le taux d'enneigement moyen. Plus le nombre de jours où il y a présence d'enneigement est important, plus la couleur est foncée. Ces opérations sont réalisées de manière automatique à partir des cartographies de la base de données pour les deux sites d'étude.

CHAPITRE 9. CRÉATION DES CARTES DE COUVERTURE NEIGEUSE :

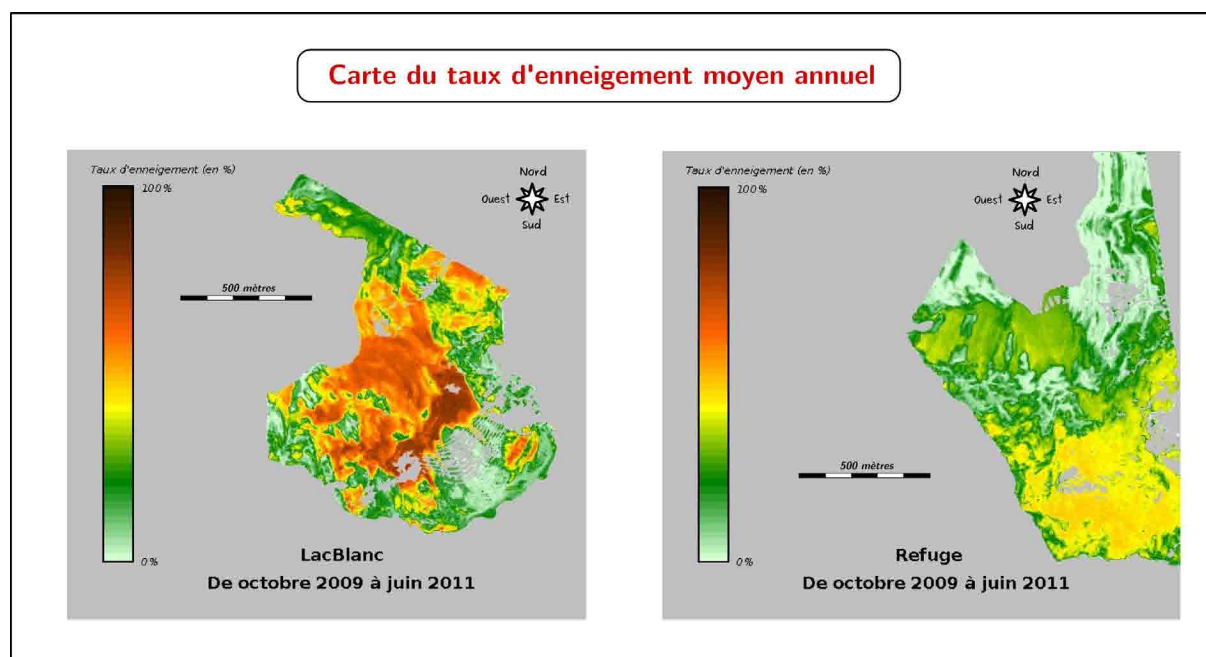


FIG. 9.3: Cartographie de l'enneigement entre octobre 2009 et juin 2011 sur les 2 sites expérimentaux du Vorz

Au premier regard, on observe une différence majeure dans l'allure générale de ces deux cartes, avec des couleurs assez foncées pour la partie haute, et des couleurs plus claires dans la partie médiane du versant. Ce résultat attendu montre que le système est cohérent, et met en évidence cette disparité entre les deux sites. Dans la partie médiane, on enregistre ainsi des durées d'enneigement de l'ordre de 30% de l'année, tandis que dans la partie haute, on est plutôt proche des 50 à 60% de l'année. La durée d'enneigement atteint quasiment deux mois dans les zones basses, ce qui influence clairement le régime hydrologique, puisque cela permet de maintenir des débits importants assez longtemps dans la saison. De même, pour les deux sites, on observe des zones où la neige semble fondre plus difficilement, avec des "tâches" plus sombres qui correspondent aux zones principales d'accumulation, ou à la base de couloirs d'avalanche.

En ce qui concerne le site du Refuge Jean-Collet, l'évolution de l'enneigement s'accorde majoritairement avec celle de l'altitude. En effet, les zones les plus enneigées sont situées dans les parties hautes, tandis que dans les parties basses, on a un enneigement moins long. Dans la partie basse de la carte, ainsi que ponctuellement sur les versants, on remarque tout de même la présence de zones où la neige reste accumulée plus longtemps. Ainsi, on notera que les cônes d'avalanches présents au pied des falaises du Mousset sont relativement bien marqués avec des couleurs vertes foncées. De même, le replat du Habert du Mousset se distingue, puisqu'il atteint des teintes jaunes, signes que l'enneigement y est plus important. Ici, cette particularité s'explique par le fait que la zone est très encaissée dans le bassin et se trouve donc relativement bien protégée du soleil, permettant ainsi une fonte plus tardive de la neige.

Dans la partie haute, le comportement est différent que celui que l'on a observé au niveau du refuge. Dans un premier temps, la présence du glacier conduit à des durées d'enneigement plus importantes sur les zones correspondantes. Dans le même temps, on observe que les durées d'enneigement sont plus importantes dans la partie centrale de la carte. Ce constat s'explique par plusieurs particularités. Tout d'abord, cette partie du bassin est encaissée et orientée vers le nord, ce qui favorise l'accumulation et la conservation de la neige. Il faut également prendre

9.1. EVOLUTION DE LA COUVERTURE NIVALE SUR LE BASSIN VERSANT :

en compte la morphologie du relief, qui assez escarpé dans les zones hautes, ne permet pas d'accumuler de la neige de manière aussi efficace que dans la dépression accueillant le Lac Blanc. Enfin, on notera que les zone exposées au sud dans la partie proche de l'appareil photographique (nord de la carte) présentent des taux d'enneigement assez faibles comparés à ceux du reste du site. En conséquence, nous sommes devant un site où la morphologie influence particulièrement l'enneigement, de manière plus importante que l'altitude, et pour lequel les durées d'enneigement annuelles sont assez importantes (60% de l'année).

CHAPITRE 9. CRÉATION DES CARTES DE COUVERTURE NEIGEUSE :

Section 9.2

Analyse des paramètres spécifiques aux modalités de fonte & accumulation :

Les informations générales sur l'enneigement extraites des cartes sont très intéressantes dans l'optique de la compréhension générale du fonctionnement hydrologique et nivologique du bassin versant. Il est possible avec la résolution dont nous disposons de travailler à des échelles spatiales encore plus précises, et d'apporter les informations nécessaires pour une modélisation distribuée et efficace de la nivologie du bassin versant. Nous verrons qu'il est possible de prendre en compte et d'analyser plus finement les paramètres physiques et morphologiques, jouant un rôle majeur dans le comportement de la neige, tels que l'altitude, l'exposition, la pente et parfois même, le cumul de plusieurs de ces paramètres.

9.2.1 L'altitude :

L'altitude est probablement le facteur le plus important pour déterminer l'évolution de l'enneigement. En effet, lors d'épisode neigeux, c'est en général le paramètre qui détermine la modalité des précipitations sous forme de neige ou non, les températures conditionnant la fonte ou l'accumulation. Ainsi, bien plus que tout les autres paramètres, il s'agit du facteur clef dans l'étude de la neige, et dans la quantification de son évolution sur le versant. La carte suivante (cf figure 9.4) représente le taux d'enneigement annuel en fonction de l'altitude. Dans cette carte, afin de mettre en évidence le rôle de celle-ci, les taux d'enneigement annuels ont été regroupés par tranches d'altitudes de 100 mètres de dénivelé. On observe ainsi une évolution du taux d'enneigement tous les 100 mètres sur les deux sites.

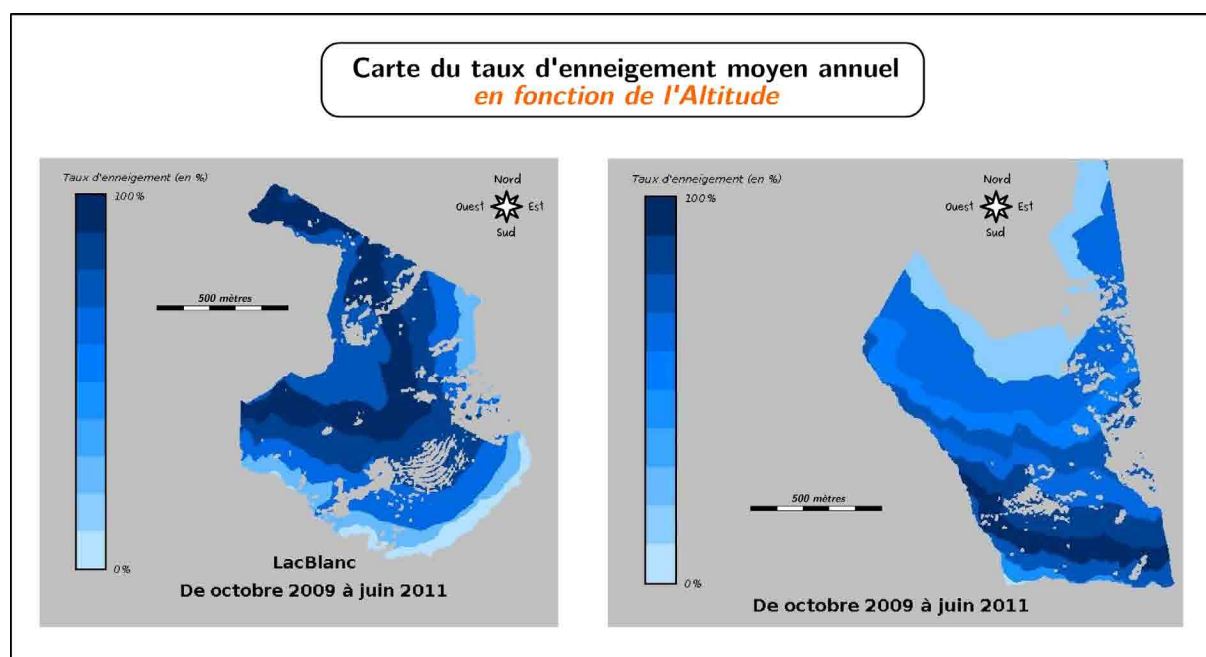


FIG. 9.4: Cartographie de l'enneigement entre octobre 2009 et juin 2011 sur les sites du Vorz

9.2. ANALYSE DES PARAMÈTRES SPÉCIFIQUES AUX MODALITÉS DE FONTE & ACCUMULATION :

L'analyse de la carte du site du Refuge vient confirmer ce que l'on a mis en évidence précédemment, à savoir que l'altitude joue un rôle prépondérant dans le comportement de la neige dans cette zone. En effet, plus on monte en altitude, plus le taux d'enneigement devient fort. Ici, l'altitude joue donc clairement un rôle majeur. On notera simplement, que pour une bande d'altitude, on assiste à une légère diminution, mais, celle-ci est due à la présence de falaises importantes qui limitent l'accumulation de la neige aux abords du Mousset.

Dans la partie haute, on observe un comportement différent, avec une dépendance à l'altitude plus mesurée. De fait, si dans la partie basse, on a une élévation progressive de la durée d'enneigement en fonction de l'altitude, l'influence du glacier se fait sentir avec un maximum atteint à sa hauteur. En revanche pour la partie sommitale, les taux d'enneigement sont très faibles, voir même inexistant à la hauteur des sommets. Ce phénomène est due en grande partie à la présence de fortes pentes limitant l'accumulation de la neige, en particulier à la hauteur du Grand Pic de Belledonne.

9.2.2 L'exposition :

Outre l'altitude, le second paramètre le plus influent sur la neige est probablement l'exposition, notamment en période de fonte, avec un impact différent de l'insolation en fonction de la position sur le versant et de la morphologie alentour. Dans la carte suivante (cf figure 9.5), on représente les hétérogénéités de la durée d'enneigement en fonction de l'exposition. Pour cela, le premier niveau de lecture est celui de l'orientation, avec des couleurs différentes en fonction des directions. L'ensemble des zones de même exposition est alors analysé et l'intensité de la couleur est déterminée en fonction des taux d'enneigement moyen à l'intérieur de celles-ci. A partir de cette carte, on pourra donc déterminer les expositions pour lesquelles les durées d'enneigement sont les plus importantes, et, quelles zones du bassin sont les plus impactées.

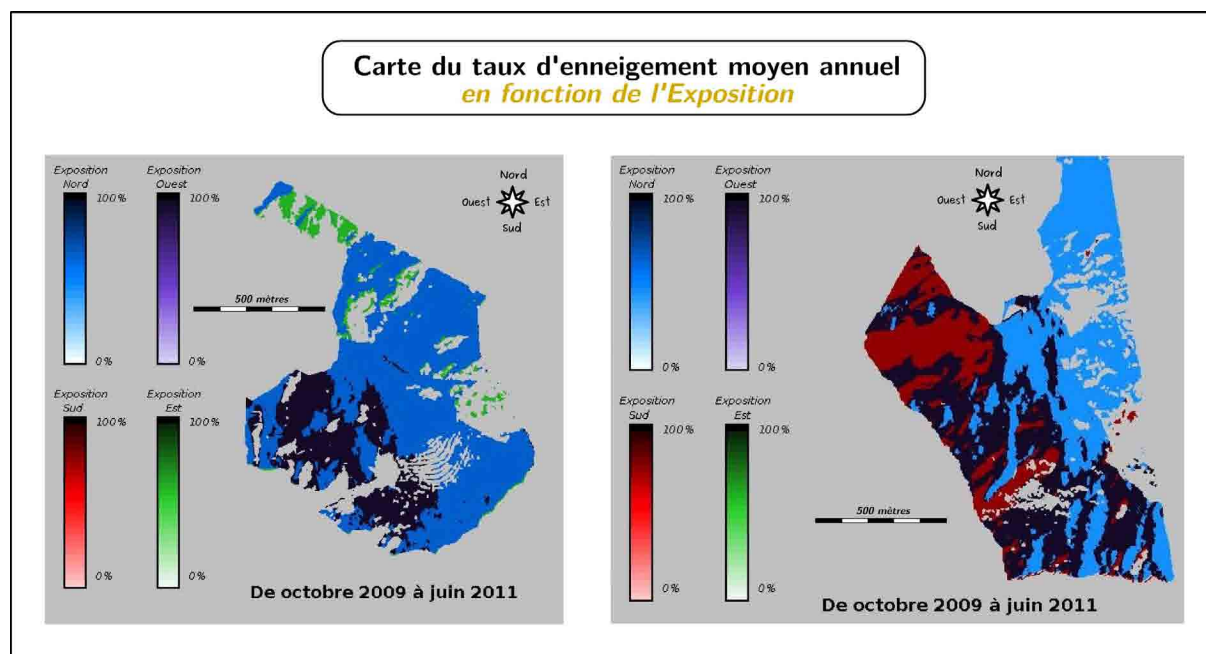


FIG. 9.5: Cartographie de l'enneigement entre octobre 2009 et juin 2011 sur les sites du Vorz

CHAPITRE 9. CRÉATION DES CARTES DE COUVERTURE NEIGEUSE :

Pour le site du Refuge, on observe que l'essentiel des zones foncées, c'est-à-dire celles présentant un enneigement de longue durée sont essentiellement situées dans la partie haute. Au contraire, dans la partie basse, l'essentiel des zones est clair. On observe cependant aucune zone foncée dans les parties médianes ou basses. En conséquence, cela met en évidence que dans cette partie du bassin, le contrôle est essentiellement réalisé par l'altitude, et, que l'orientation n'influe pas de manière évidente. En effet, dans le cas contraire, on aurait observé par exemple des surfaces orientées au nord en partie basse dans une couleur relativement sombre. Cela confirme que dans cette situation les excès de neige locaux du Mousset sont essentiellement dus à un l'encaissement marqué, et à la présence de zones d'accumulations préférentielles (couloirs d'avalanches, cones de déjection,...).

En ce qui concerne le Lac Blanc, on observe un comportement légèrement différent. Ainsi, même si dans l'ensemble la corrélation est essentiellement due à l'altitude, on observe la présence de zones sombres orientées à l'ouest et au nord dans la partie voisine du lac, et donc à "basse altitude". Cela veut dire que pour ces zones, il existe un contrôle supplémentaire qui dépend de l'exposition. En conséquence, il conviendra d'analyser cette tendance plus précisément, en particulier en analysant les données mensuelles qui pourront mettre en évidence une tendance saisonnière à cette influence en relation avec la course du soleil.

9.2.3 Altitude et exposition :

Nous venons de présenter les cartes des découpages en fonction de l'altitude et de l'exposition. Cependant, le meilleur moyen d'obtenir des informations précises pourrait être de mixer les deux techniques pour observer l'imbrication du rôle des paramètres que l'on a analysé indépendamment. L'avantage de cette technique est que cette fois-ci, on va analyser les durées d'enneigement en fonction de leur altitude et de leur exposition, on aura ainsi un découpage plus précis pouvant mettre en évidence des déséquilibres entre exposition pour une même altitude par exemple. Les cartes de la figure 9.6 montrent les résultats de cette opérations sur les deux sites d'étude.

9.2. ANALYSE DES PARAMÈTRES SPÉCIFIQUES AUX MODALITÉS DE FONTE & ACCUMULATION :

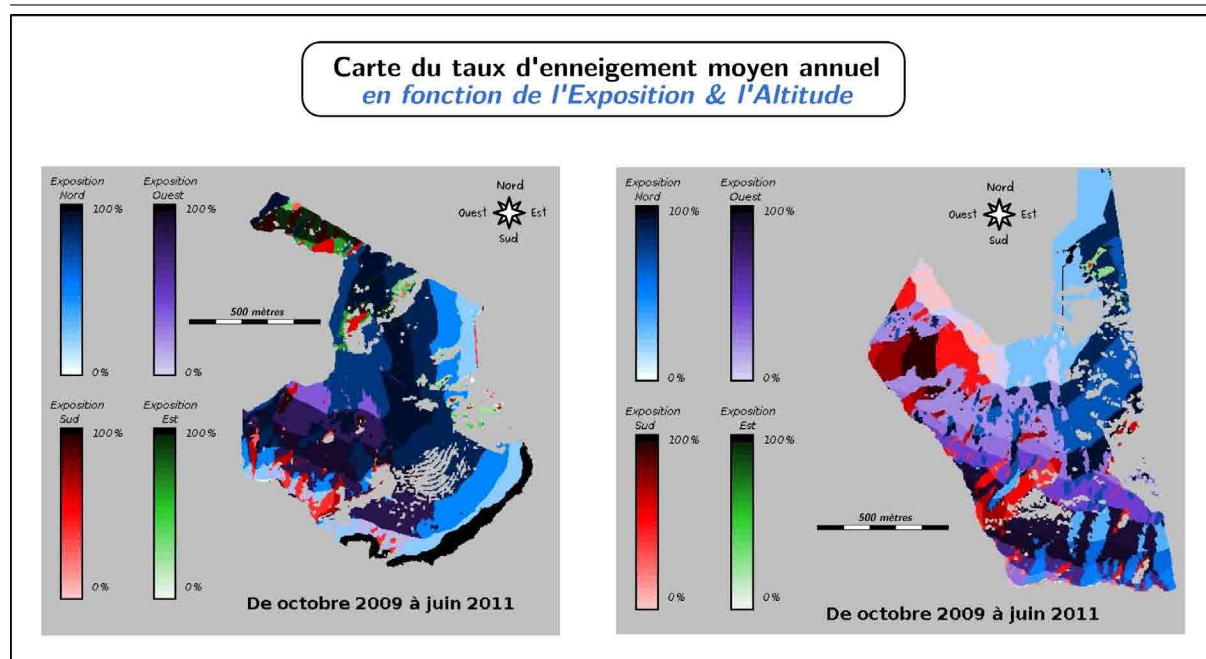


FIG. 9.6: Cartographie de l'enneigement entre octobre 2009 et juin 2011 sur les sites du Vorz

Au niveau du refuge, on met en évidence une disparité claire entre la zone est et la zone ouest. Il semble en effet, que les couleurs soient plus sombre à l'ouest (orienté vers l'est) qu'à l'est (orienté à l'ouest), et ce, quelle que soit l'altitude. Cela correspond en réalité à la course du soleil qui éclaire la partie ouest du bassin le matin, et l'après-midi réchauffe considérablement les pentes est à proximité du refuge. Cette disparité est clairement observable sur le terrain puisque on observe la présence de neige le long des falaises du Mousset très tard dans la saison, tandis qu'au niveau du refuge, on est assez vite en situation de déneigement, et ce, malgré l'altitude.

Pour le Lac Blanc, le constat ne change pas par rapport à précédemment, l'altitude même si elle a clairement un rôle important est supplantée dans la partir ouest par l'encaissement et la nature de l'exposition. Ainsi, les pentes de la grande Lance de Domène resteront enneigées plus longtemps que les zones proches de l'appareil photographique orientées à l'est et au sud. Dans cette zone, l'altitude jouera donc un rôle important lors de la phase d'accumulation de la neige, mais, il faudra considérer de manière efficace l'exposition, qui joue clairement un rôle dans l'initiation de la disparité dans la durée d'enneigement sur le versant.

9.2.4 La pente :

Le dernier paramètre que l'on peut prendre en compte dans l'accumulation de la neige et son comportement est la pente. Pour cela, on a regroupé chaque zone du bassin en fonction de la pente locale par différentes classes de 10 degrés d'amplitude. A partir de ces zones de pentes homologues, on calcule le taux de d'enneigement moyen. Ainsi, la couleur représentera la durée d'enneigement, et, plus la couleur sera sombre, plus la pente sera importante. Les cartes de la figure 9.7 présentent les résultats obtenus à l'issue de cette analyse selon les pentes.

CHAPITRE 9. CRÉATION DES CARTES DE COUVERTURE NEIGEUSE :

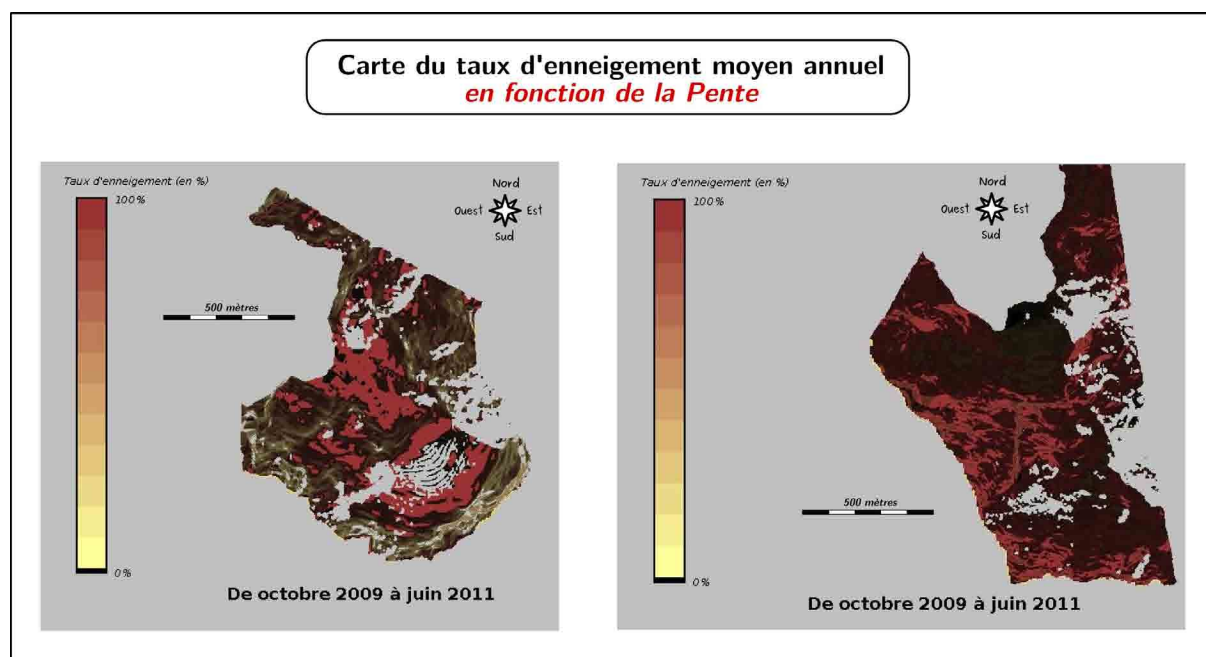


FIG. 9.7: Cartographie de l'enneigement entre octobre 2009 et juin 2011 sur les sites du Vorz

La lecture de ces deux cartes met clairement en évidence le rôle de la pente dans la répartition de l'enneigement. Ainsi, à chaque zone plane, on observe des taux d'enneigement forts (vers le rouge foncé et noir). Dans le même temps, les zones à fortes pentes telles que les sommets de Belledonne ou les falaises du Mousset présente des taux d'enneigement beaucoup plus faibles. Ainsi, la pente jouera un rôle particulier lors de la période d'accumulation de la neige, et les quelques jours suivants, ou l'on peut observer des phénomènes de purge. Cependant, en terme de fonte nivale à long terme, ce paramètre aura une importance moindre.

L'ensemble de ces analyses permet de profiter de la haute résolution spatiale du capteur SnoDEC. Néanmoins, nous n'avons analysé aucune de ces grandeurs au cours du temps, puisque nous nous sommes contentés d'analyser des tendance annuelles. C'est donc le travail que nous allons effectuer à présent.

Section 9.3

Informations spatiales et temporelles sur l'évolution du manteau neigeux :

La prise en compte du facteur temporel est essentielle dans la compréhension des mécanismes d'enneigement. A partir des techniques d'analyses précédemment exposées, une étude au pas de temps mensuel a été menée à bien, permettant de mettre en évidence les disparités de fonctionnement et de répartition au cours d'une saison. On se focalisera sur la durée géné-

9.3. INFORMATIONS SPATIALES ET TEMPORELLES SUR L'ÉVOLUTION DU MANTEAU NEIGEUX :

rale d'enneigement par pixel, puis, nous verrons quels sont les impacts et effets de l'altitude et de l'exposition.

9.3.1 Evolution mensuelle de l'enneigement sur le bassin versant du Vorz :

L'analyse au pixel près l'évolution de l'enneigement pour chaque mois a permis de déterminer la tendance sur l'ensemble de la période de mesure. Les résultats sont présentés dans les figures 9.8 et 9.9.

La première remarque que l'on peut faire, est que le pic d'enneigement se produit au mois d'avril sur les deux sites. En conséquence, la fonte ne commence pas avant cette période. La fonte est ensuite très rapide pour la partie basse, tandis qu'elle s'étale sur une plus longue durée dans la partie haute. On peut noter qu'en aucun cas, les taux d'enneigement mensuels ne sont nuls, il en découle qu'il doit se produire ponctuellement des chutes de neige qui viennent "perturber" ces enregistrements. Cela est confirmé par les graphes d'évolutions journalières présentés dans la première section de ce chapitre.

Le minimum d'enneigement est atteint pour le site du refuge en octobre, tandis que pour le Lac Blanc, on observe à partir d'août une remontée de l'enneigement. En effet, en raison de son altitude plus élevée, la neige refait son apparition rapidement. L'ensemble de ces remarques permet de confirmer les idées développées précédemment, mais, il convient maintenant de voir quelle est l'influence des autres paramètres sur ces données.

CHAPITRE 9. CRÉATION DES CARTES DE COUVERTURE NEIGEUSE :

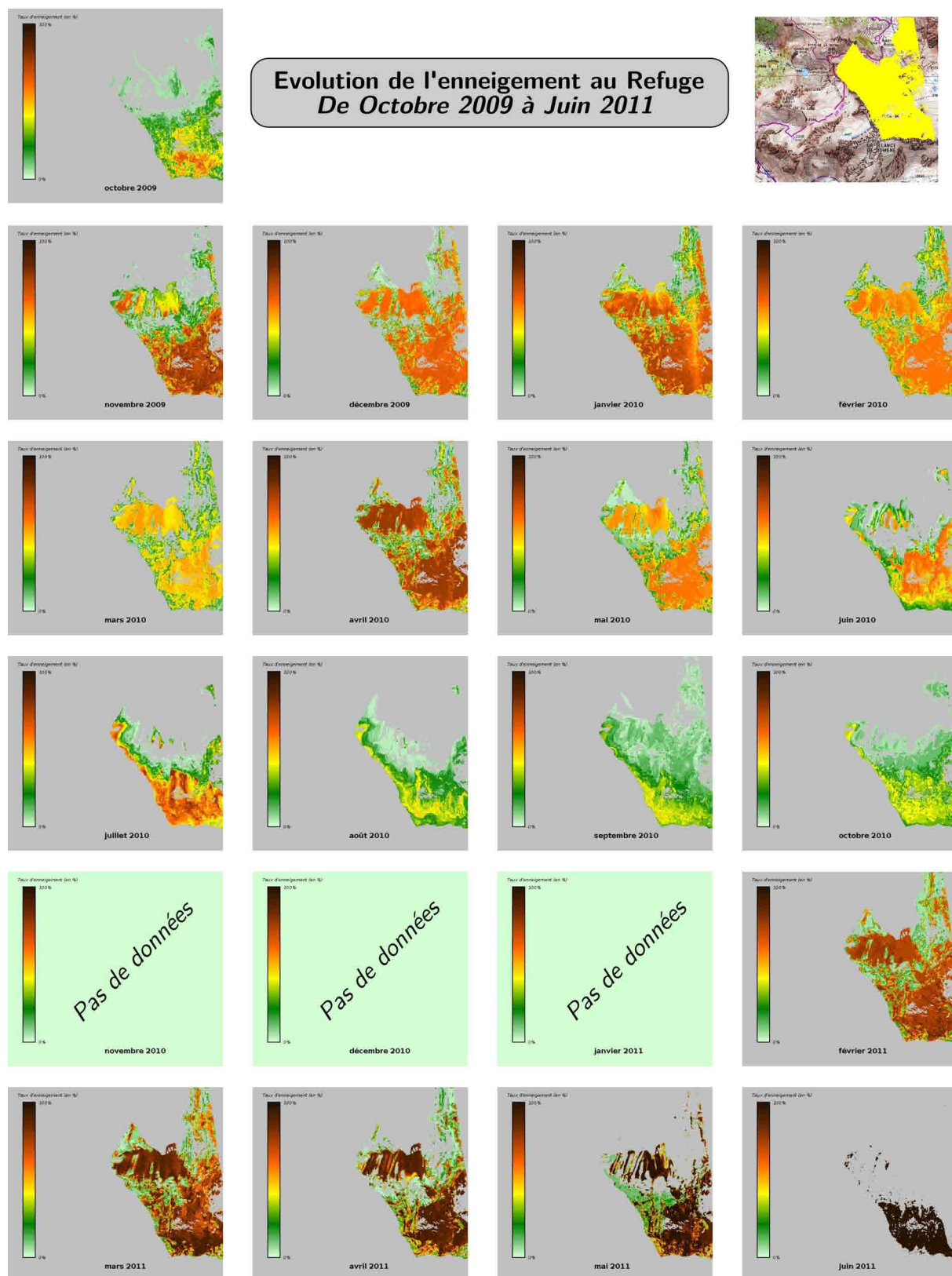


FIG. 9.8: Evolution des proportions d'enneigement mensuelles sur le site du Refuge

9.3. INFORMATIONS SPATIALES ET TEMPORELLES SUR L'ÉVOLUTION DU MANTEAU NEIGEUX :

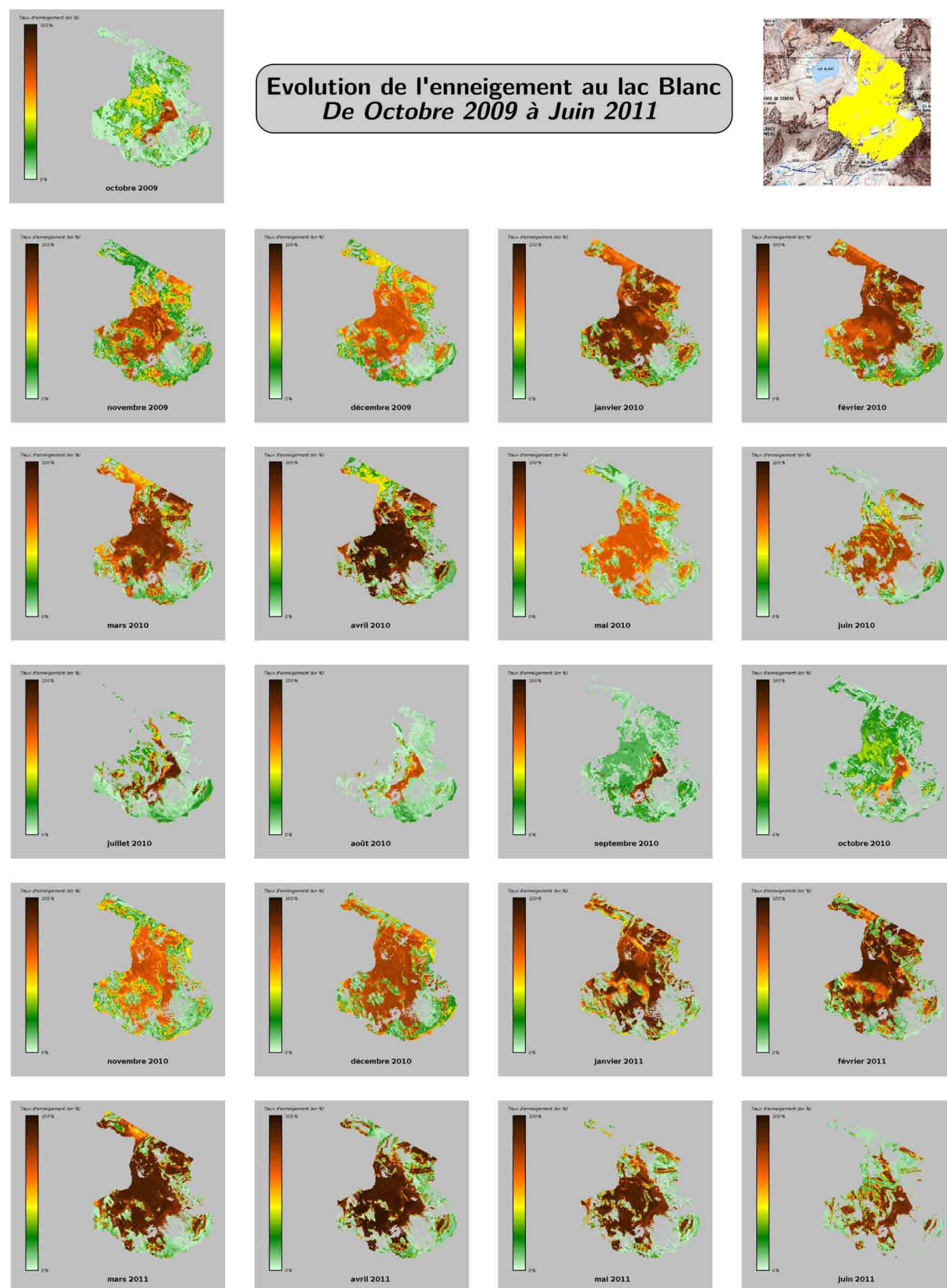


FIG. 9.9: Evolution des proportions d'enneigement mensuelles sur le site du Lac Blanc

CHAPITRE 9. CRÉATION DES CARTES DE COUVERTURE NEIGEUSE :

9.3.2 Evolution mensuelle de l'enneigement sur le bassin versant du Vorz en fonction de l'altitude et de l'exposition :

A partir de la technique de traitement mise en place, nous sommes à même d'analyser simultanément l'impact de l'altitude et de l'exposition, et ce, au pas de temps mensuel. Les résultats de ces analyses sont présentés dans les figures 9.10 et 9.11.

Au niveau du refuge les cartes mettent clairement en évidence la disparité est-ouest du versant. En effet, dès le mois d'Avril, on observe la présence de zones plus foncées à l'ouest du versant tandis que l'est se déneige rapidement. En ce sens, les faits les plus marquants sont les évolutions observées durant l'été. On a dit tout à l'heure que les enneigements estivaux étaient dus à de faibles chutes de neiges fondant rapidement. Or, il s'avère que cette fonte semble plus rapide sur le côté est aux alentours du refuge qu'au niveau des falaises du Mousset à l'ouest (orienté est). De même, le minimum d'enneigement est atteint en août, et, la fonte débute dès le mois d'avril comme déjà analysé précédemment.

Pour ce qui est du Lac Blanc, ces cartes permettent de quantifier les tendances déjà mises en évidence précédemment. Toutefois, on confirme à partir de celles-ci que la zone proche de l'appareil, orientée au sud se déneige très rapidement, tandis que les zones nord et ouest de basse altitude restent enneigées très longtemps. De même, le minimum d'enneigement est atteint dès le mois d'août, et, le début de la véritable accumulation de la neige se produit dès le mois d'octobre.

9.3. INFORMATIONS SPATIALES ET TEMPORELLES SUR L'ÉVOLUTION DU MANTEAU NEIGEUX :

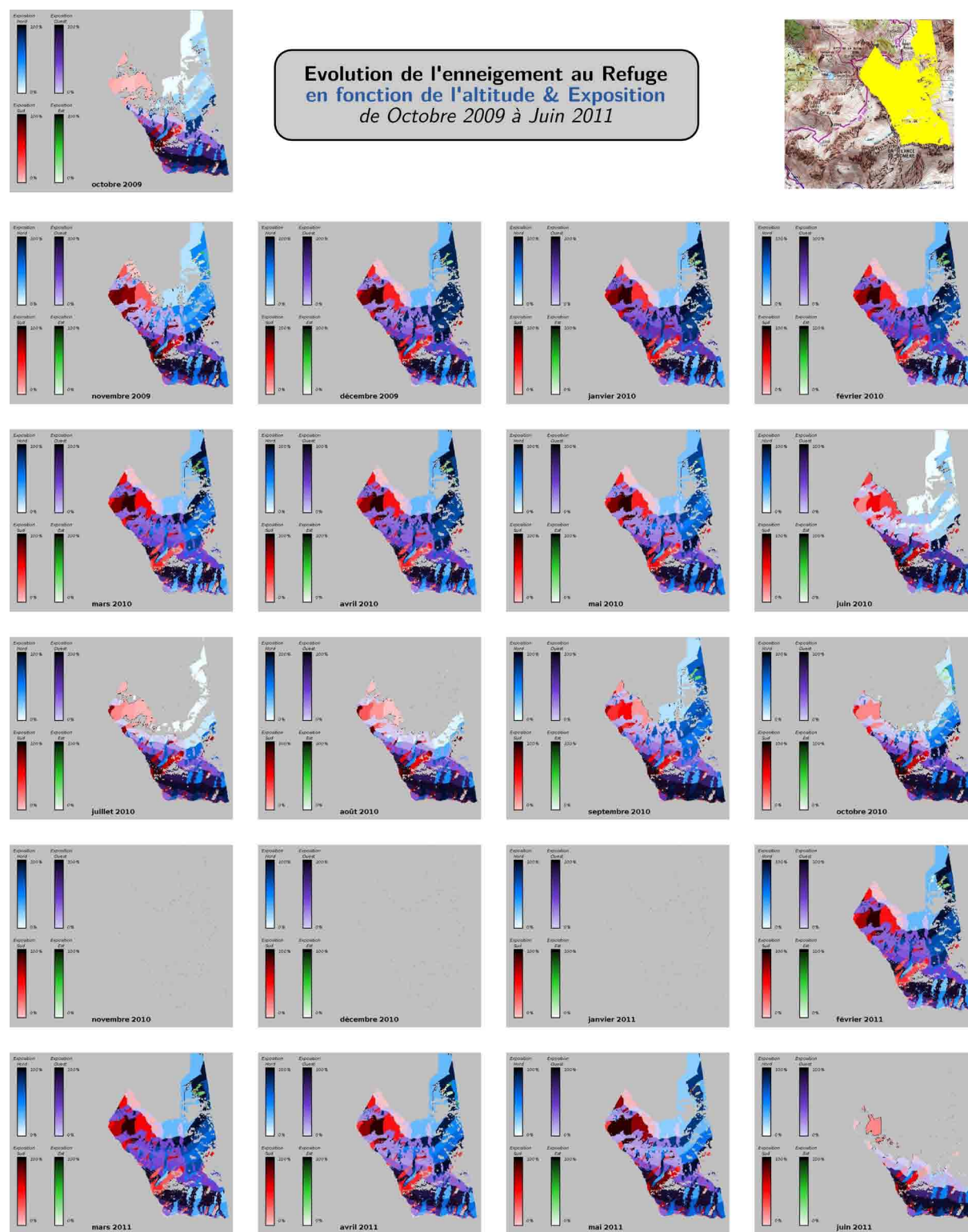


FIG. 9.10: Evolution des proportions d'enneigement mensuelles sur le site du Refuge en fonction de l'altitude et de l'exposition

CHAPITRE 9. CRÉATION DES CARTES DE COUVERTURE NEIGEUSE :

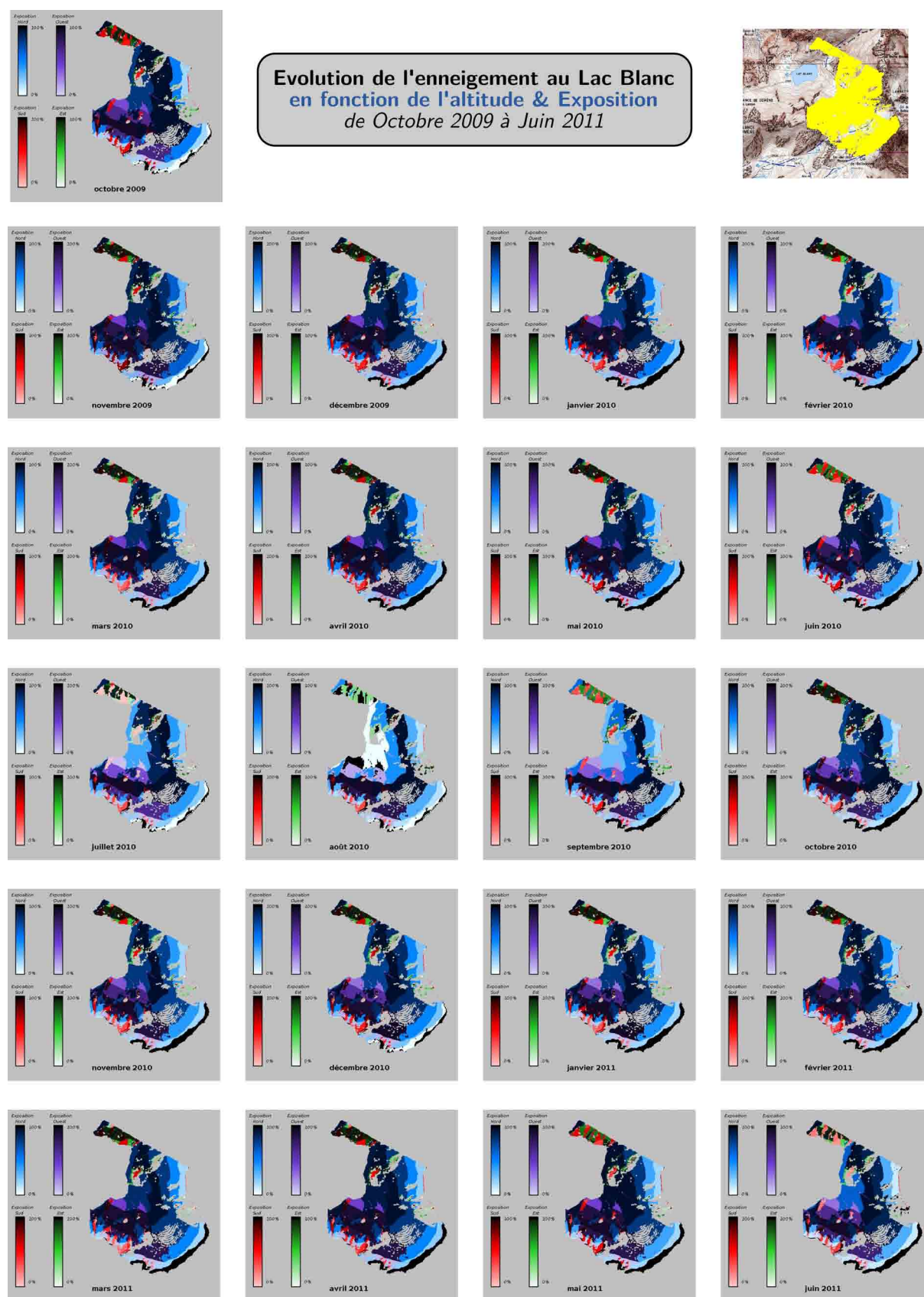


FIG. 9.11: Evolution des proportions d'enneigement mensuelles sur le site du Lac Blanc en fonction de l'altitude et de l'exposition

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 9 :

Au cours de cette partie, nous avons montré le potentiel des cartes produites par le capteur SnoDEC, en terme d'analyse des paramètres physiques et morphologiques. Nous avons également pu profiter à cette occasion de la forte résolution spatiale et temporelle du capteur. Les différentes analyses menées montrent que la couverture neigeuse sur le bassin versant a un impact essentiel sur l'hydrologie, puisqu'elle est présente de 10 mois par an dans la partie haute, et environ 6 à 8 mois dans les parties les plus basses observées par les capteurs. Dans la partie sommitale, on notera la présence du glacier de Freydane qui occupe environ 5 à 10% de la surface visible pour le capteur du Lac Blanc.

Lorsque l'on s'intéresse aux principaux paramètres pouvant influencer sur la couverture neigeuse, on se rend compte que l'altitude et l'exposition jouent un rôle prépondérant. Ainsi, les zones situées au sud se déneigent bien plus vite que celles du nord (environ 2 à 3 semaines de différence). Dans le même temps, sur l'ensemble de la zone observée, on enregistre des durées de fonte de l'ordre de 5 mois. Dans la partie basse du bassin, l'enneigement commence à peu près simultanément avec celui de la partie haute dès la fin du mois d'octobre. Pour la fonte, on commence à observer un déneigement conséquent à partir de début avril dans la partie basse (1600 mètres) contre la fin du mois de juin pour les parties hautes (2400 mètres).

Malgré tout, nous n'avons pour le moment pas utilisé tout le potentiel de ces données, puisque ces analyses ne sont que qualitatives. Ainsi, l'objet des prochains chapitres sera d'utiliser les informations quantitatives disponibles, de manière à modéliser les évolutions de la neige sur le versant en fonction de l'altitude, de l'exposition, de la saison et tous les paramètres entrant en jeu à cette occasion.

D'autre part, il est possible d'utiliser ces données spatiales et temporelles pour analyser certains types de situations comme des chutes de neige épisodiques, ou des vitesses de fonte variables, en mettant en avant leurs disparités. Ces possibilités sortant du cadre unique de la création de carte d'enneigement mais relevant pleinement de leur exploitation et de leur analyse seront présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre 10:

Utilisation alternative du capteur SnoDEC :

Sommaire du Chapitre:

10.1 Mesure de la hauteur :	237
10.1.1 Détermination des points de références pour les hauteurs :	237
10.1.2 Principe de calcul de la hauteur : Equivalence taille pixel vs. Surface terrain	239
10.1.3 Détermination des hauteurs de neige sur le bassin versant du lac Blanc :	242
10.1.4 Détermination des hauteurs de neige à la cabane du Replat du Pleyne :	245
10.1.5 Analyse de la faisabilité de la détection automatique des hauteurs de neige et des potentiels de résolution :	246
10.2 Etude de phénomènes physiques spécifiques :	249
10.2.1 Dynamique glaciaire :	249
10.2.2 Observation du cycle végétatif :	252
10.3 Application à différents sites de mesure :	257

Introduction du Chapitre 10 :

Dans un premier temps, nous avons présenté les principes et mécanismes nécessaires à la cartographie de l'enneigement en continu sur les bassins versants de montagne, qui constituait l'objectif initial du projet. Cependant, les différentes recherches et essais effectués sur notre base de données d'images, sur différents sites (Lac Blanc, Refuge Jean-Collet, Anterne,...) ont mis en évidence des possibilités d'extraction de données, autres que celles de la simple caractérisation de présence de neige ou non.

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques idées d'utilisations alternatives à la cartographie de l'enneigement, à partir des données brutes (photographies). Nous montrerons dans cette partie des exemples de quelques idées d'informations intéressantes et alternatives pouvant être extraites, manuellement dans un premier temps, des images acquises automatiquement par les appareils photographiques.

Section 10.1

Mesure de la hauteur :

L'objectif initial du capteur est de détecter la présence de neige afin de contraindre un modèle de simulation nivologique, puis, hydrologique. Ainsi, une des valeurs les plus influentes dans ce type de modèle en zone de montagne ou susceptible d'être enneigée, est l'épaisseur du manteau neigeux et le contenu en eau de la neige, indispensable au calcul de l'équivalent en eau (SWE). Cependant, pour réaliser ce calcul, il est nécessaire de connaître les caractéristiques mécaniques et physiques de la neige en tout point du bassin versant, ou à défaut de ces données, au minimum la hauteur de neige. Cette hauteur pourrait être approchée par des techniques stéréoscopiques, mais cela reste aujourd'hui inenvisageable, compte tenu de la résolution des appareils photographiques, notamment à grande distance. En revanche, il semble possible à partir des images dont nous disposons de déterminer ponctuellement l'épaisseur du manteau neigeux.

10.1.1 Détermination des points de références pour les hauteurs :

Dans un premier temps, nous ne travaillerons que sur les images du Lac Blanc. En effet, nous disposons dans cette image d'un point de référence idéal : le totalisateur à neige. Bien que relativement éloigné de l'appareil photographique, il est parfaitement visible sur les images et constitue une sorte d'échelle pour calculer les hauteurs de neige, avec une précision relative, comme nous le montrerons par la suite.

Il existe dans la photographie plusieurs autres zones au niveau desquelles il est possible d'estimer visuellement une hauteur de neige : rocher, rupture de pente,... L'utilisation de ces zones permettra de réaliser un échantillonnage sur l'ensemble de la partie haute du bassin versant.

La détermination des zones ou points spécifiques utilisés pour effectuer ce calcul de hauteur est faite à partir d'images où le manteau neigeux est extrêmement important, afin de localiser les parties visibles même en cas de chutes de neige abondantes, et disposer ainsi d'un point fixe pour estimer à partir de celui-ci la différence de hauteur avec le manteau neigeux. Ce travail a été réalisé sur plusieurs photographies différentes, dont nous ne présenterons ici qu'un seul exemple (*cf. figure 10.1*).

10.1. MESURE DE LA HAUTEUR :



FIG. 10.1: Sélection des points de références potentiels pour la détermination de l'épaisseur du manteau neigeux

Lorsque l'on a déterminé les sites où nous allons effectuer l'estimation des épaisseurs du manteau neigeux, il est nécessaire de déterminer le rapport entre la taille des pixels sur l'image et les dimensions réelles sur le terrain.

CHAPITRE 10. UTILISATION ALTERNATIVE DU CAPTEUR SNODEC :

10.1.2 Principe de calcul de la hauteur : Equivalence taille pixel vs. Surface terrain

10.1.2.1 Principe de l'équivalence pixel / surface réelle :

Lorsque l'on prend une photographie d'un paysage ou d'une surface quelconque, on réalise en réalité une projection d'un espace en 3 dimensions vers une image en 2 dimensions. Ainsi, lors de cette étape, les transformations géométriques effectuées peuvent déformer certaines zones de l'image. Pour une focale donnée, plus on s'éloigne de l'appareil photographique, plus la résolution d'un pixel diminue. En effet, au premier plan de l'image, un pixel va représenter une surface de quelques centimètres dans la réalité, tandis que dans l'arrière plan, la taille des pixels image va correspondre à quelques mètres ou dizaines de mètres dans la réalité (cf. figure 10.2).

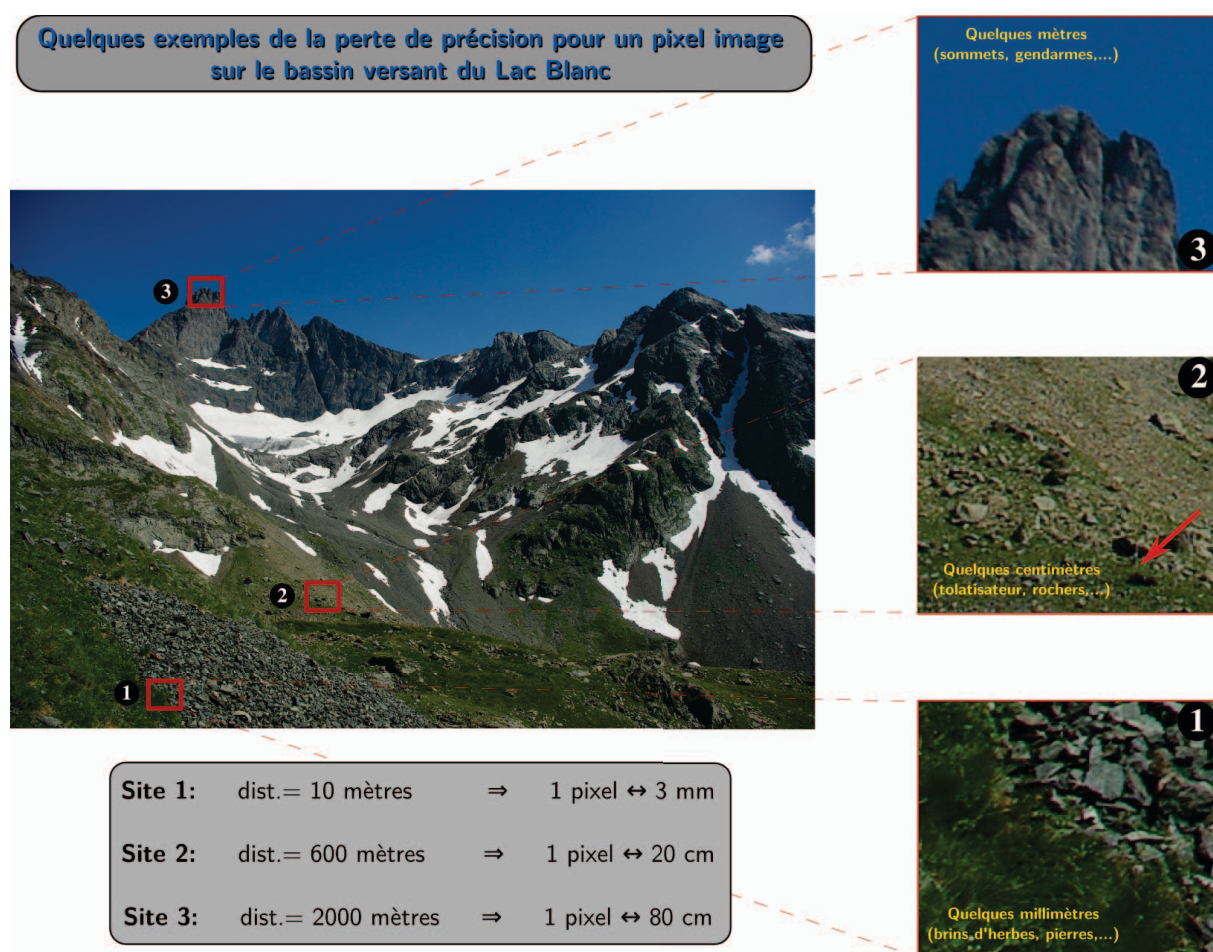


FIG. 10.2: Evolution de la précision des pixels en fonction de la distance à l'appareil photographique

La figure précédente montre clairement la dépendance entre la position du site dans l'image, et la résolution que l'on peut escompter sur le calcul de la hauteur. De fait, la position par rapport à l'appareil devra être prise en compte dans le calcul, puisque on va réaliser un comptage des différences de pixels entre deux images ("été" et "hiver"). Ainsi, on va calculer pour chaque site la résolution d'un pixel dans cette zone spécifique, afin de pouvoir à partir des différences de hauteur du manteau neigeux, déterminer la hauteur réelle de neige.

10.1. MESURE DE LA HAUTEUR :

En ce qui concerne la détection de la hauteur de neige sur l'image proprement dite, cette opération se fera dans un premier temps visuellement. En effet, les zones étudiées étant très limitées (quelques pixels de surface) il est extrêmement difficile d'implémenter un algorithme automatique capable de trouver avec précision la limite, souvent très "lissée", entre la neige et les rochers alentours. De plus, l'appareil étant fixé relativement loin de certains sites, des micros-déplacements sont susceptibles d'engendrer des déplacements de plusieurs pixels sur l'image, ce qui veut dire que le site n'est pas forcément fixe. Ainsi, il faudrait également implémenter un algorithme de reconnaissance de forme afin de localiser la zone dans l'image, ce qui sort du cadre de cette simple étude de faisabilité et de potentiel de résolution.

10.1.2.2 Calcul de la relation entre taille d'un pixel et résolution réelle :

La relation entre la taille d'un pixel image et sa surface réelle sur le terrain est dépendante de paramètres internes (focale, taille du capteur CCD, nombre de pixels image,...), et des facteurs externes (distance à l'appareil, effets atmosphériques,...). Il s'agit donc dans un premier temps de connaître les caractéristiques techniques de l'appareil photographique utilisé.

a) Caractéristiques technique du **Pentax K200-D** :

- Focale : 18mm
- Taille Capteur CCD : 15,27mm × 23,7mm
- Résolution image : 3872 × 2592

Grâce à ces données, il est possible de mettre en place une méthode de calcul pour estimer la taille réelle sur le terrain d'un pixel image.

b) Calcul de la résolution d'un pixel image sur le terrain :

Un des éléments déterminant dans la résolution d'une image en photographie est la taille de la focale. En effet, celle-ci permet de donner un angle de vue plus ou moins important à la lumière qui sera enregistrée sur le capteur CCD situé au coeur de l'appareil. De fait, plus on va avoir une focale faible, plus l'image sera étendue en surface (au détriment de la précision), et plus on va avoir une focale importante, plus on va zoomer sur une zone de la scène. Le dispositif du système de prise de vue est présenté dans la figure 10.3.

Cette figure (figure 10.3) met en évidence l'existence de deux composantes distinctes liées à la résolution d'un pixel, soit selon l'axe X, soit selon l'axe Y. Dans la réalité, ces deux valeurs sont très proches, la différence entre le nombre de pixels en X et Y étant en général assez peu différente. Dans notre cas, les deux valeurs seront calculées, et, on gardera la plus importante, afin de maximiser l'erreur et de ne pas surestimer les capacités du système.

A partir des deux projections sur les axes X et Y, il est possible d'écrire une équation générale permettant de déterminer la résolution d'un pixel en fonction de la distance à l'appareil photographique. En utilisant le théorème de Thalès, on pose :

$$\frac{focale}{distance} = \frac{T_{pixel}}{T_{reelle}}$$

avec :

$$T_{pix_X} = \frac{CCD_X}{Nb_{pixel_X}} \quad T_{pix_Y} = \frac{CCD_Y}{Nb_{pixel_Y}}$$
$$T_{reelle} = \frac{T_{pix} \cdot distance}{focale} \quad (10.1)$$

CHAPITRE 10. UTILISATION ALTERNATIVE DU CAPTEUR SNODEC :

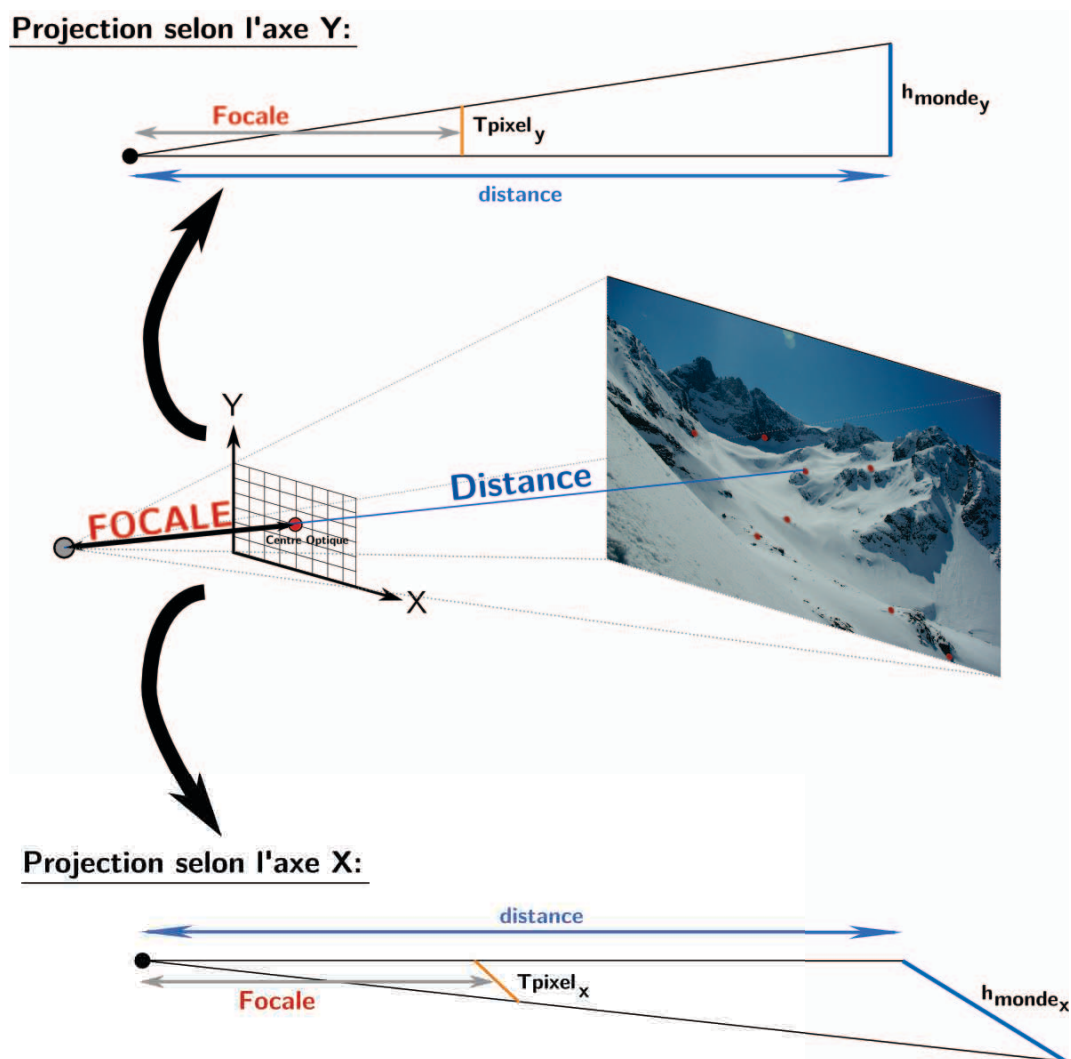


FIG. 10.3: Schéma simplifié du mécanisme théorique d'une prise de vue photographique

Le premier élément sur lequel nous avons travaillé sur le bassin versant est le totalisateur à neige de la station météorologique, observable sur l'image prise par l'appareil (cf. figure 10.4).

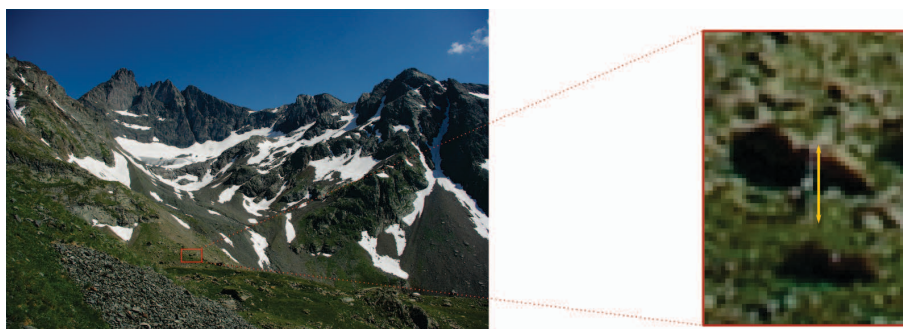


FIG. 10.4: Identification du Totalisateur dans l'image du bassin versant

10.1. MESURE DE LA HAUTEUR :

L'identification du totalisateur réalisée manuellement permet d'observer sur celui-ci l'évolution du manteau neigeux au cours de la saison. Afin de calculer la résolution théorique de cette mesure, on va utiliser les formules définies précédemment, sachant que la totalisateur est distant d'environ 600 mètres de l'appareil. On a alors :

$$T_{pix_X} = \frac{CCD_X}{Nb_{pixel_X}} = \frac{0,0235}{3872} = 6,069 \cdot 10^{-6} m$$
$$T_{pix_Y} = \frac{CCD_Y}{Nb_{pixel_Y}} = \frac{0,0157}{2592} = 6,057 \cdot 10^{-6} m$$

$$T_{reelle_X} = \frac{\frac{CCD_X}{Nb_{pixel_X}} \cdot Distance}{focale} = \frac{\frac{0,0235}{3872} \cdot 600}{0,018} = 0,2023 m$$
$$T_{reelle_Y} = \frac{\frac{CCD_Y}{Nb_{pixel_Y}} \cdot Distance}{focale} = \frac{\frac{0,0157}{2592} \cdot 600}{0,018} = 0,2019 m$$

Dans cet exemple, on peut vérifier que l'écart entre l'incertitude selon X et Y est très faible, de l'ordre du millimètre. On a ainsi pour le totalisateur une résolution de pixel de l'ordre de **20 centimètres**.

10.1.3 Détermination des hauteurs de neige sur le bassin versant du lac Blanc :

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, il est possible sur certaines zones de l'image de réaliser une détection manuelle du niveau de l'enneigement sur certains points fixes tels que des rochers caractéristiques, des escarpements,... Au cours de ce travail, cette opération a été réalisée au pas temps mensuel sur la partie supérieure du bassin versant du Vorz, au niveau du Lac Blanc, afin d'en déterminer le potentiel réelle d'utilisabilité. L'ensemble de ces opérations a été mené manuellement, du fait de la complexité importante de l'implémentation d'un algorithme de traitement automatique, qui serait sorti du cadre général de ce travail. A partir de deux images de référence, nous avons déterminé les sites potentiellement utilisables pour une telle démarche. La sélection d'un site de référence potentiel se fait en utilisant deux images différentes : une estivale (sans neige) et une hivernale (hauteur de neige maximale, après un épisode neigeux par exemple), dans lesquelles on recherche des sites visibles en permanence et susceptibles de présenter une verticalité utilisable comme échelle. Dans ce cadre, nous avons sélectionné 7 cibles d'orientations et d'altitudes variées, afin de représenter la variabilité morphologique du bassin versant. L'ensemble de ces sites est présenté dans l'image 10.5, accompagné de leurs caractéristiques (cf. tableau 10.1).

CHAPITRE 10. UTILISATION ALTERNATIVE DU CAPTEUR SNODEC :

	Altitude	Exposition	Distance	Précision
Site 1	2200 m	Est	0,300 km	10,10 cm
Site 2	2550 m	Nord-Est	1,300 km	43,75 cm
Site 3	2425 m	Nord-Est	1,100 km	37,00 cm
Site 4	2680 m	Nord-Ouest	1,800 km	60,65 cm
Site 5	2425 m	Sud-Ouest	1,300 km	43,75 cm
Site 6	2250 m	Nord-Est	0,750 km	25,25 cm
Totalisateur	2225 m	Ouest	0,600 km	20,20 cm

TAB. 10.1: Caractérisitques morphologiques des sites sélectionnés



FIG. 10.5: Localisation des sites de référence sélectionnés pour le calcul des hauteurs de neige

Après avoir effectué la détection manuelle sur chaque image, il est possible à partir des formules présentées précédemment, de calculer la résolution d'un pixel pour chaque site, et d'en déduire l'évolution des hauteurs de neige au cours de la saison. Les résultats de cette opération sont présentés dans la figure 10.6.

Ainsi, même s'il suivent tous une évolution logique durant la saison hivernale : accumulation de novembre à février et fonte à partir de mars/mai, les dates de début d'accumulation, de fin de fonte ou encore la vitesse, varient fortement d'un site à l'autre ; l'ensemble des graphes met en évidence certaines diparités d'évolutions pour les différents sites d'études :

- La première différence remarquable concerne le comportement des hauteurs en fonction de l'exposition des sites. Ainsi, les sites orientés au sud ont des vitesses de fonte bien plus élevées que ceux situés au nord (différence entre les sites 1 & 6 par exemple).

10.1. MESURE DE LA HAUTEUR :

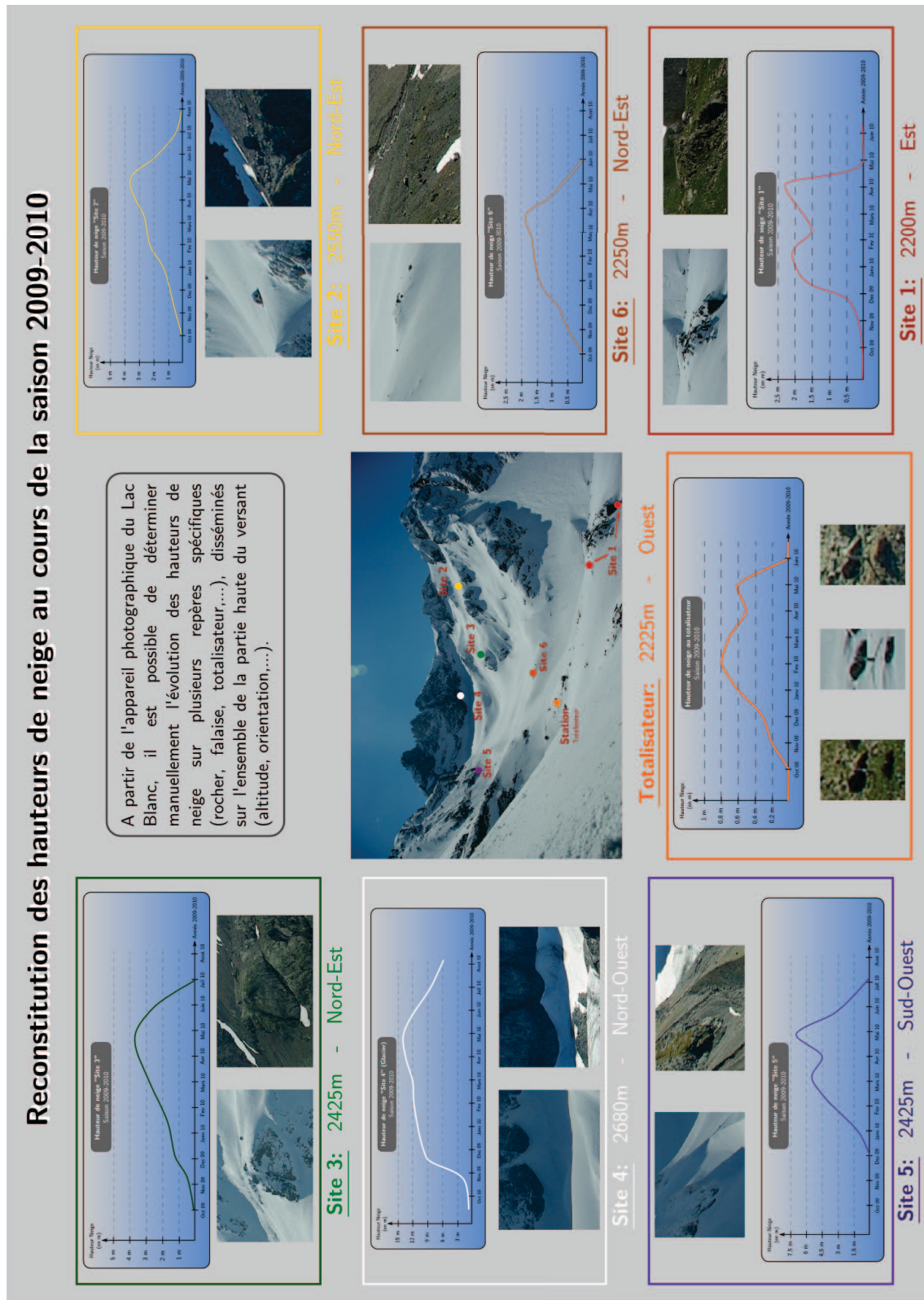


FIG. 10.6: Evolution des hauteurs de neige dans la partie supérieure du bassin versant du Vorz au cours de la saison 2009-2010

CHAPITRE 10. UTILISATION ALTERNATIVE DU CAPTEUR SNODEC :

- L'altitude des différents sites entre également en jeu au niveau de la fonte. Les sites 6, 3 et 2 situés à respectivement 2250m, 2425m et 2550m mettent en évidence ce phénomène. Pour le site le plus bas, la fonte se termine au mois de juin, tandis que pour les deux autres, on observe de la neige jusqu'en juillet et août.
- La position du site et la morphologie locale jouent également un rôle essentiel dans l'évolution de l'enneigement. Au niveau du totalisateur par exemple, on observe une fonte rapide de la neige, notamment due au fait de sa position en sommet de crête morainique, particulièrement exposée au soleil. A contrario, sur le site 5, nous sommes au niveau d'un ressaut rocheux, au pied duquel la neige s'accumule très fortement en hiver (couloirs d'avalanches ou de déjections) et fond plus tard, jusque vers le mois de juillet (confirmé par des observations de terrain), à des altitudes relativement semblables.

Cette figure permet donc de présenter quelques données ponctuelles sur les hauteurs de neige, pouvant être utilisées dans la contrainte des modèles nivologiques en premier lieu. Cependant, une utilisation systématique sur l'ensemble du bassin versant semble délicate à mettre en oeuvre, pour des raisons qui seront détaillées dans le paragraphe suivant. Ainsi cet outil semble être une bonne méthode d'observation des mécanismes de fonte, mais ne permet pas d'être utilisé systématiquement comme donnée d'entrée d'un modèle journalier par exemple. En revanche, ces données vont permettre de compléter celle de la présence de neige et nous permettrons de mieux contraindre et caler les différents modèles mis en place sur le versant.

10.1.4 Détermination des hauteurs de neige à la cabane du Replat du Pleynet :

A l'image de ce que nous venons d'effectuer avec les images issues du capteur SnoDEC, il est possible d'effectuer les mêmes opérations sur les images obtenues par le système HyMAGE. Ainsi, les graphes suivants présentent les variations des hauteurs de neige sur le site du Pleynet pour les deux saisons passées (cf fig.10.7). Du fait de la faible profondeur de champ des images, la résolution et la précision des mesures est bien plus importante avec ces données (2,5 centimètres de précision avec l'ancienne caméra).

10.1. MESURE DE LA HAUTEUR :

Estimation des hauteurs de neige à partir de la Caméra du Pleynet

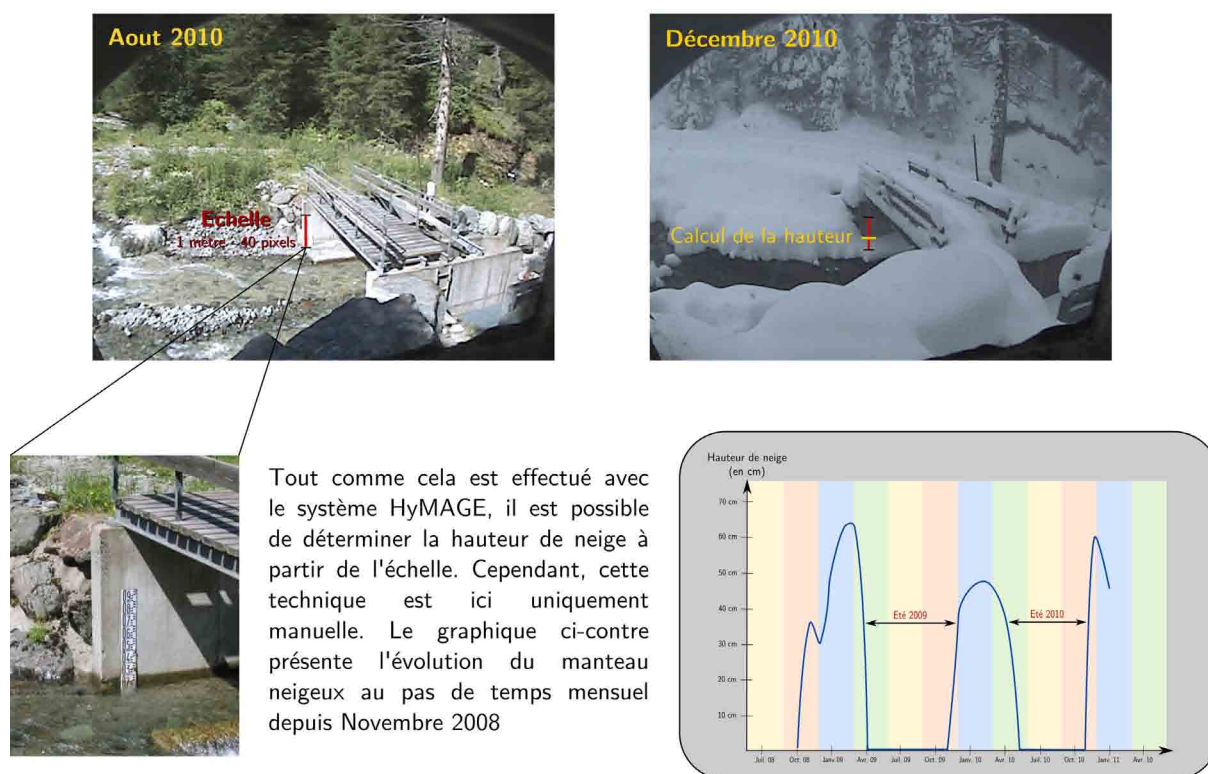


FIG. 10.7: Evolution des hauteurs de neige à la Cabane du Pleynet depuis Novembre 2008

Ainsi, ces mesures montrent une période d'enneigement beaucoup plus limitée au Pleynet, notamment en raison de l'altitude. Cependant, sa position très encaissée dans le versant conduit à une fonte totale du manteau neigeux globalement aux alentours de la fin du mois d'avril.

10.1.5 Analyse de la faisabilité de la détection automatique des hauteurs de neige et des potentiels de résolution :

L'analyse de l'évolution du manteau neigeux en plusieurs points du bassin versant a mis en évidence la cohérence de la méthode de détection employée. Cependant, au delà des résultats quantitatifs en terme de hauteur, il est indispensable de ne pas perdre de vue le caractère très dépendant de ces résultats aux facteurs morphologiques locaux. En effet, d'une part la position des sites dans le versant (arêtes, couloirs, ombre,...), et d'autre part la morphologie locale du site (creux sous les rochers, bordure de cône de déjection, plat exposé au vent,...) tendent à rendre le caractère quantitatif et la valeur absolue de hauteur très dépendants de ces effets de sites. Il est donc logique d'observer de grandes différences de hauteurs de neige entre les sites, et, même si celle-ci sont cohérentes, elle ne correspondent pas forcément à la réalité du manteau neigeux de l'ensemble du versant, mais plutôt à une zone restreinte au site étudié.

Malgré la faisabilité des mesures de hauteurs de neige à partir des images, plusieurs facteurs viennent limiter l'utilisation de cette technique à l'ensemble du bassin. Ainsi, le principal facteur limitant est lié à la distance. En effet, plus on s'éloigne de l'appareil photographique, plus la résolution d'un pixel devient faible. Il devient dès lors illusoire de vou-

CHAPITRE 10. UTILISATION ALTERNATIVE DU CAPTEUR SNODEC :

loir travailler sur les hauteurs de neige avec des résolutions de l'ordre de 50 cm, puisque l'on dispose déjà de l'information sur la présence de neige. Le gain en précision des données serait entâché de grandes incertitudes, ainsi que d'un temps de travail trop conséquent. Cependant, on peut penser que l'amélioration des techniques d'imageries grand public viendront compenser ces lacunes dans un futur proche.

De même, de légères oscillations, probablement dues au vent, ont pour conséquence de déplacer les images de quelques pixels d'une prise de vue à l'autre. Même s'il reste possible de localiser les zones de manière absolue par leurs coordonnées, la détection de la hauteur, qui plus est à grande distance, devient alors particulièrement délicate et sujette au seul jugement de l'oeil de l'utilisateur. De plus, une automatisation de ce traitement semble inenvisageable en l'état actuel des avancées de ce travail, notamment en raison des très faibles différences de code RGB et du "moyennage local", dû à la distance observée sur les images. La solution la plus appropriée serait alors la mise en place d'un algorithme de reconnaissance de formes (pour localiser la zone dans l'image), adapté aux conditions d'enneigement variable, puis, la détection de la neige, soit par la technique des "droites de neige", soit par un réseau de neurones par exemple.

Aujourd'hui, une solution alternative à ce problème pourrait être la mise en place d'échelles en plusieurs points clés que l'on souhaite échantillonner. Cependant, l'efficacité de ce mode opératoire serait fortement dépendant du nombre d'échelles. De plus, même si il serait bien plus aisé à réaliser qu'une détection automatique, il resterait limité et difficilement représentatif de l'ensemble du bassin versant. Une autre alternative pour la détection des hauteurs pourrait être l'utilisation de la stéréoscopie (réalisée avec deux appareils photographiques). A l'heure actuelle, même si cette technique est abordable et implémentable, elle resterait limitée par la résolution des appareils de prise de vue et reste donc une solution inadaptée.

Dans ce contexte, il peut être particulièrement intéressant de disposer d'une vue d'ensemble des précisions des données atteignables sur l'ensemble du bassin. A partir des connaissances des caractéristiques de l'appareil et d'un Modèle Numérique de Terrain, on peut, en utilisant les formules vues dans les parties précédentes calculer pour chaque zone du bassin une résolution théorique des mesures. Cette carte d'utilisation potentielle des hauteurs de neige est présentée dans la figure 10.8.

10.1. MESURE DE LA HAUTEUR :

Potentiel d'utilisation des images dans la détection des hauteurs de neige

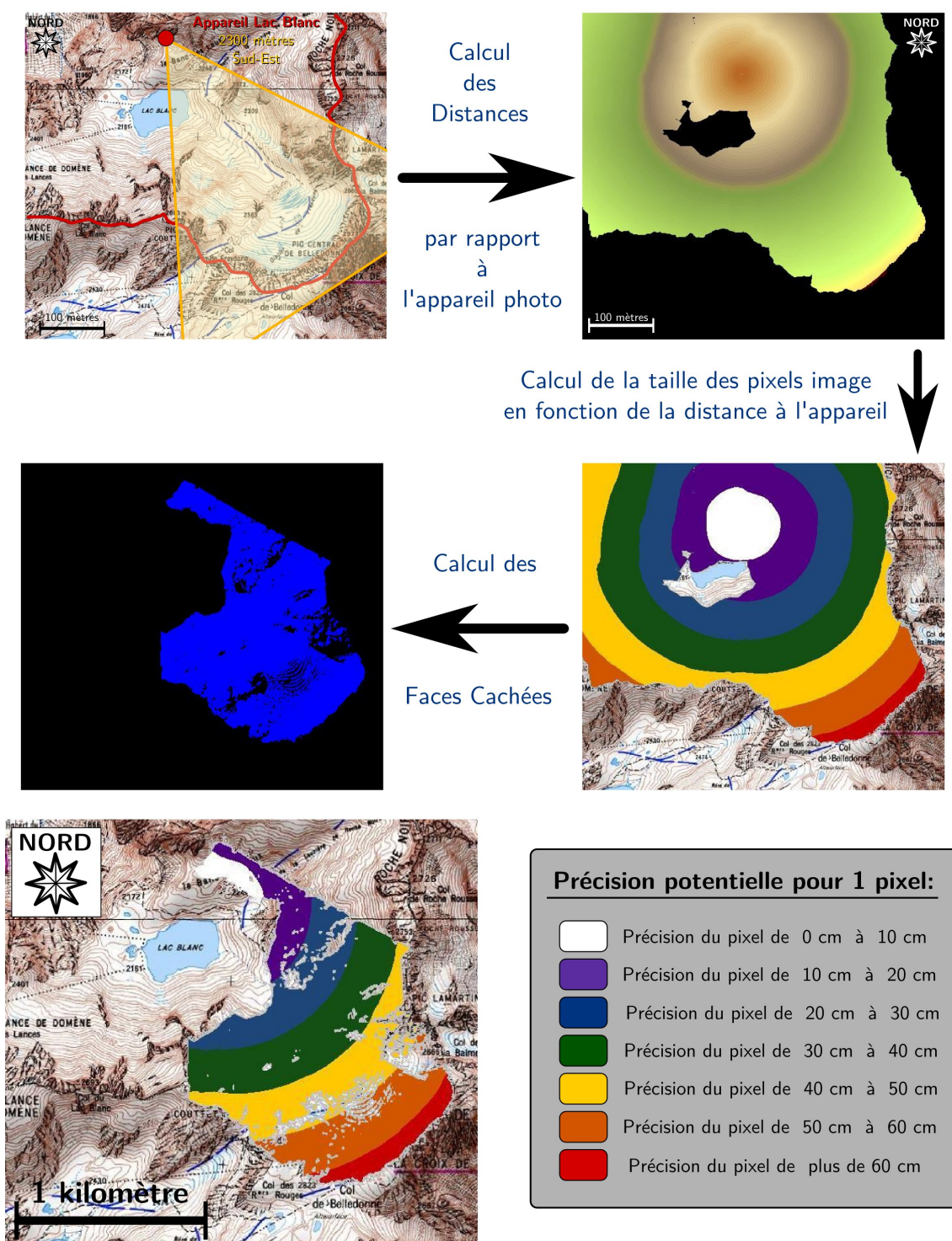


FIG. 10.8: Carte du potentiel d'utilisabilité des images pour la détection des hauteurs de neige

Section 10.2

Etude de phénomènes physiques spécifiques :**10.2.1 Dynamique glaciaire :**

La partie haute du bassin versant du Vorz est recouverte d'un petit glacier : le glacier de Freydane ($\sim 0,5 \text{ km}^2$). Dans un contexte d'évolution climatique particulier en zone de haute montagne au niveau des glaciers, il est important d'observer cette évolution afin de la quantifier et d'en estimer les impacts. Une nouvelle fois, l'utilisation des appareils photographiques pourrait être adaptée de son utilisation initiale et être utilisée pour estimer l'importance des retraits glaciaires. Ainsi, à partir des images, on peut non seulement étudier l'évolution de la limite du glacier, mais également observer sa dynamique telle que l'évolution des zones de glace découverte, des champs de crevasses, de la recharge nivale annuelle (bilan de masse,...). Nous allons dans cette section montrer la faisabilité de ces quantifications.

10.2.1.1 Evolution du front glaciaire

Dans un contexte de retrait glaciaire important, il est aujourd'hui nécessaire de quantifier ces reculs, en particulier sur les petits édifices glaciaires tel que celui de Freydane. En effet, ces glaciers jouant un rôle important dans le cycle hydrologique de ces bassins versants de haute montagne, leur disparition pourrait modifier considérablement le régime hydrologique des rivières alentours, ainsi que la disponibilité de la ressource en eau en particulier en été. Dans ce cadre, l'appareil photographique mis en place dans la partie supérieure du Vorz acquiert des images idéales dans l'optique d'une quantification du retrait glaciaire.

En fonctionnement depuis le mois de octobre 2009, le capteur permet au sortir de l'automne 2010 de dresser un premier bilan de l'évolution du glacier pendant l'année. Il est à noter que la fin de printemps et le début d'été particulièrement pluvieux ont considérablement amélioré les conditions de neige lors de cette saison, et, cela a été renforcé par un été sans chaleurs extrêmes du point de vue des conditions météorologiques. De fait, le recul glaciaire a été limité durant la saison, comme le montre les images ci-dessous.

10.2. ETUDE DE PHÉNOMÈNES PHYSIQUES SPÉCIFIQUES :

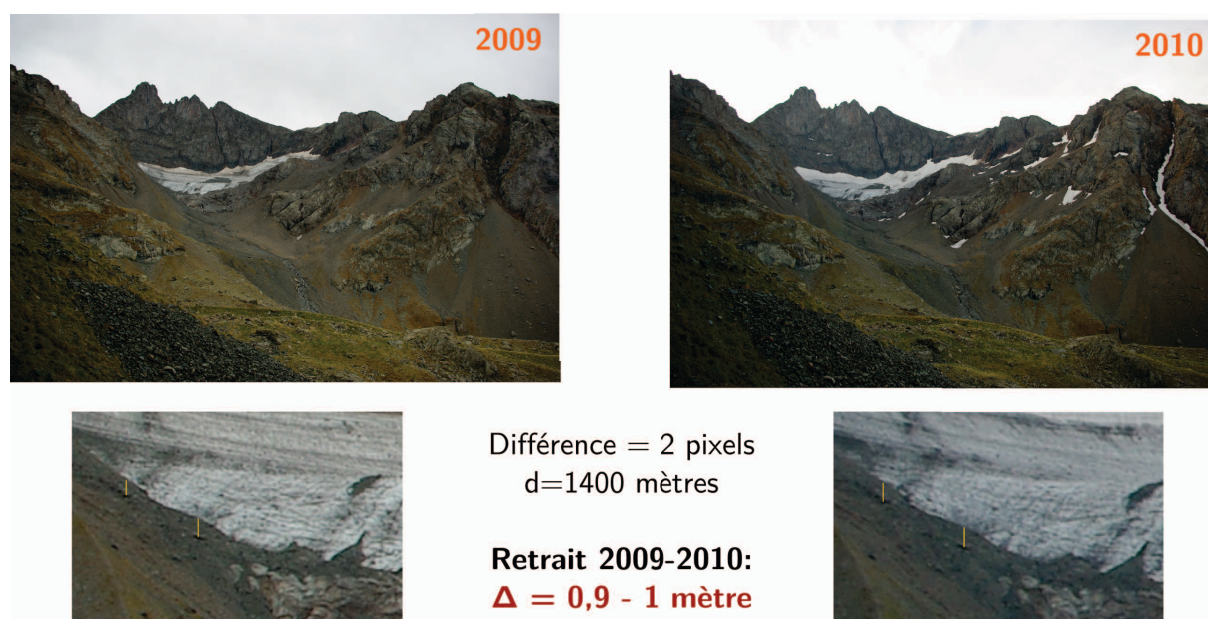


FIG. 10.9: Evolution glaciaire durant la saison 2009-2010

Les deux images ont été sélectionnées comme étant les dernières images exploitables avant les premières chutes de neige de l'hiver. On peut ainsi observer une couverture neigeuse plus abondante en 2010, notamment dans la partie supérieure du glacier. Le front glaciaire quand à lui présente le même aspect les deux années, à savoir, un front entièrement en glace, sans couverture nivale. Ces deux images permettent l'estimation d'un recul quantifié à environ 1 mètres sur une année, ce qui est relativement limité comparé à la tendance actuelle, et confirme que la saison 2009-2010 a été moins préjudiciable que les précédentes.

10.2.1.2 Analyse de la recharge nivale, vers un bilan de masse :

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, il est possible de mesurer les hauteurs de neige en certains points spécifiques de la photographie. Ainsi, ce travail mené dans la zone d'accumulation du glacier de Freydane met en évidence une saison 2009-2010 plutôt positive pour le bilan de masse du glacier. En effet, on constate qu'au mois d'octobre 2010, date des premières chutes de neige, l'ablation n'est pas aussi importante qu'en 2009, et, on observe toujours des parties enneigées sur le glacier. Selon les relevés de hauteur, le bilan est même positif, avec des gains de hauteur de l'ordre de 2 ou 3 mètres (bordure de couloir) dans la zone ciblée.

10.2.1.3 Etude de la dynamique glaciaire :

Une dernière possibilité d'extraction d'information dans les images est celle de la dynamique glaciaire. Outre l'évolution des zones de crevasses observables sur le glacier (cf. figure 10.11), nous avons la chance sur le bassin versant du Vorz de disposer d'un point fixe sur le glacier, qui peut permettre d'estimer et d'approcher les vitesses de déplacement. En effet, sur le glacier, reposent les vestiges d'un important éboulement rocheux s'étant produit en 2005, ainsi, la comparaison de la position de quelques rochers significatifs de cet écoulement peut permettre de revenir à une estimation de la vitesse.

CHAPITRE 10. UTILISATION ALTERNATIVE DU CAPTEUR SNODEC :

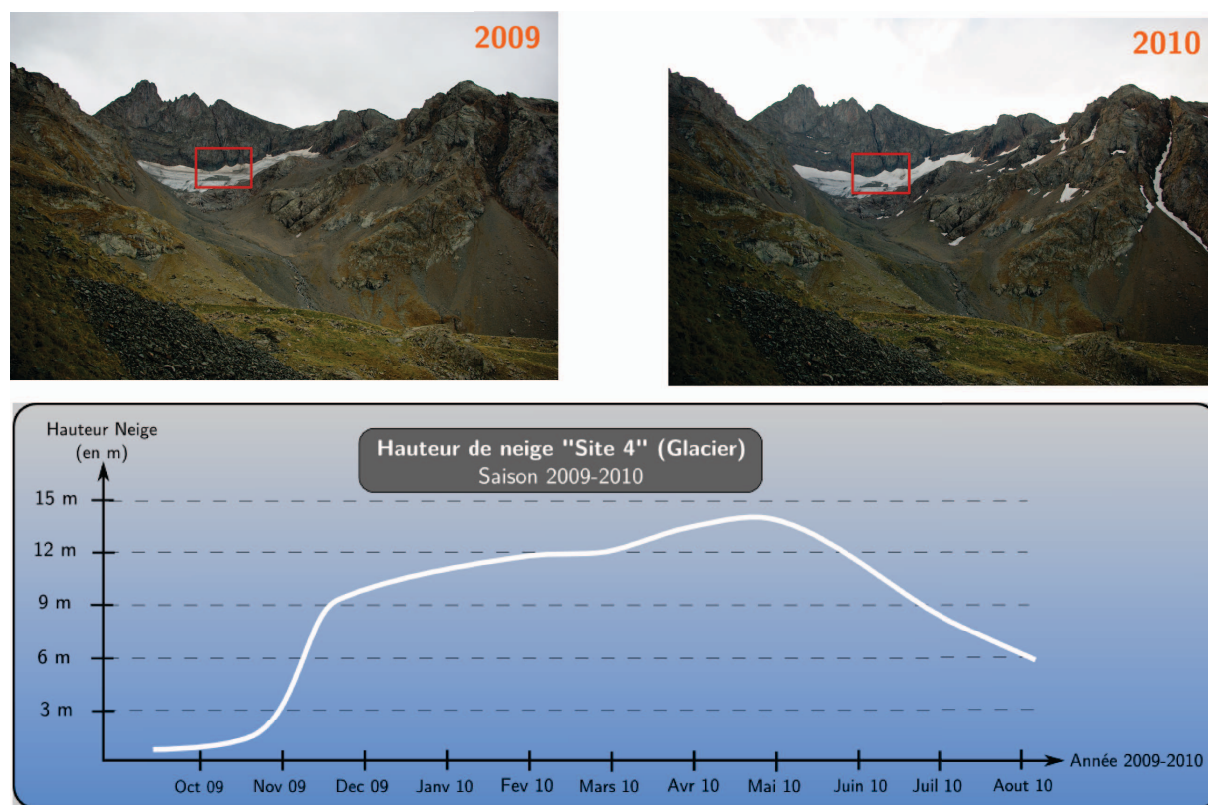


FIG. 10.10: Vers un "bilan de masse" de la saison 2009-2010

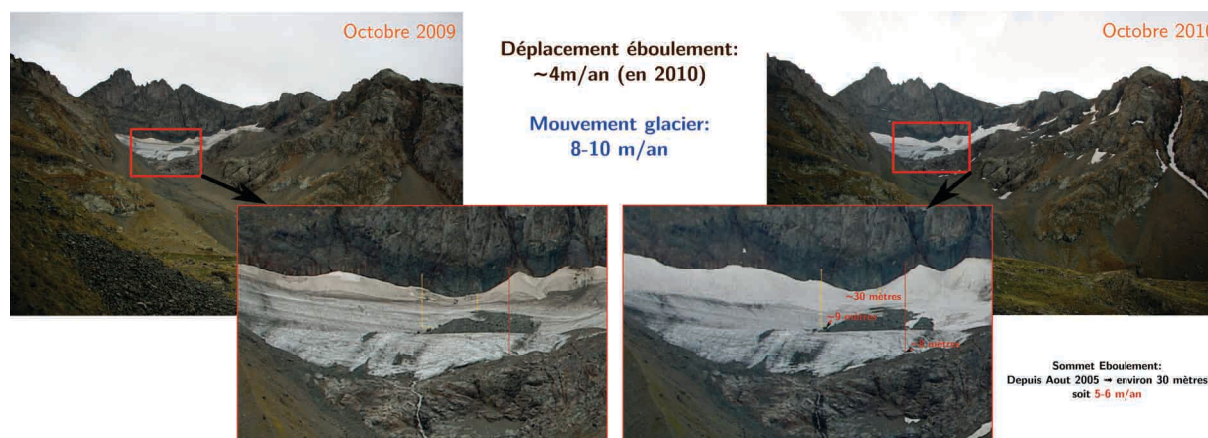


FIG. 10.11: Mouvements glaciaires sur le glacier de Freydane

Ainsi, comme le montre la figure 10.11 le glacier de Freydane, même s'il est aujourd'hui relativement petit, dispose d'une dynamique d'écoulement active de l'ordre de 8 à 10 mètres par an dans la partie frontale et 5 à 6 mètres par an dans le bassin d'alimentation. On observe donc une vitesse plus importante dans la partie basse du glacier que dans la partie haute, ce qui est conforme à ce que l'on attendait et que l'on observe sur la plupart des édifices glaciaires de ce type. L'éboulement rocheux constitue un point de repère particulièrement efficace pour déterminer cette avancée et permet de confirmer les vitesses trouvées pour l'année 2009-2010,

10.2. ETUDE DE PHÉNOMÈNES PHYSIQUES SPÉCIFIQUES :

puisque celles-ci s'accordent parfaitement avec la vitesse moyenne observée depuis 2005 de 5 à 6 mètres par an.

10.2.2 Observation du cycle végétatif :

A l'image de ce qui a été réalisé pour les hauteurs de neige, le système SnoDEC peut être utilisé de manière alternative pour nous apporter des informations sur l'évolution de la végétation à la surface du bassin versant. Nous allons ici étudier la faisabilité de cette utilisation manuelle sur un échantillon d'images de la saison 2009-2010. Les informations concernant la végétation telles que la période de floraison ou le déclenchement du brunissement automnale sont des informations importantes, notamment au niveau de l'estimation de l'évapotranspiration. En effet, elles nous renseignent sur la position dans le cycle végétatif, ainsi que sur le potentiel d'absorption en eau de la végétation.

10.2.2.1 Création d'un indice de végétation :

Dans un premier temps, l'idée est de développer un indice nous permettant d'estimer rapidement et globalement sur les images le stade du cycle végétatif. Ainsi, nous avons besoin d'estimer le couvert végétal sur le bassin versant. Pour cela, nous allons utiliser des techniques dérivées de la télédétection donnant de bons résultats ([Zakaluk, 2008](#), [122]) sur les images satellites et modifiées pour les appliquer sur nos photographies classiques. Notre choix s'est porté sur les 3 indices ayant montré les meilleurs résultats sur quelques images :

- Normalisation selon le canal G
- L'indice NDGBI (*Normalized Difference Green Blue Index*)
- L'indice NDRBI (*Normalized Difference Red Blue Index*)

On pourra poser les relations suivantes :

$$NDGBI = \frac{G - B}{G + B} \quad NDRBI = \frac{R - B}{R + B} \quad Y = \frac{G}{R + G + B} \quad (10.2)$$

Le site retenu pour tester la pertinence de la méthode est celui du Refuge Jean-Collet. Nous disposons sur ce site d'une quantité d'images importante (plus de 2000 images), qui nous permet d'échantillonner correctement l'ensemble de la saison. La sélection des images se fait manuellement et permet d'éliminer les images inutilisables en constituant un échantillon d'environ 50 éléments. Sur chaque image, on va analyser l'ensemble des codes RGB des pixels, et utiliser nos formules d'indices de végétation, afin de déterminer quel est le plus pertinent à utiliser. Les résultats des calculs des indices pour chaque image sont présentés dans la figure 10.12.

CHAPITRE 10. UTILISATION ALTERNATIVE DU CAPTEUR SNODEC :

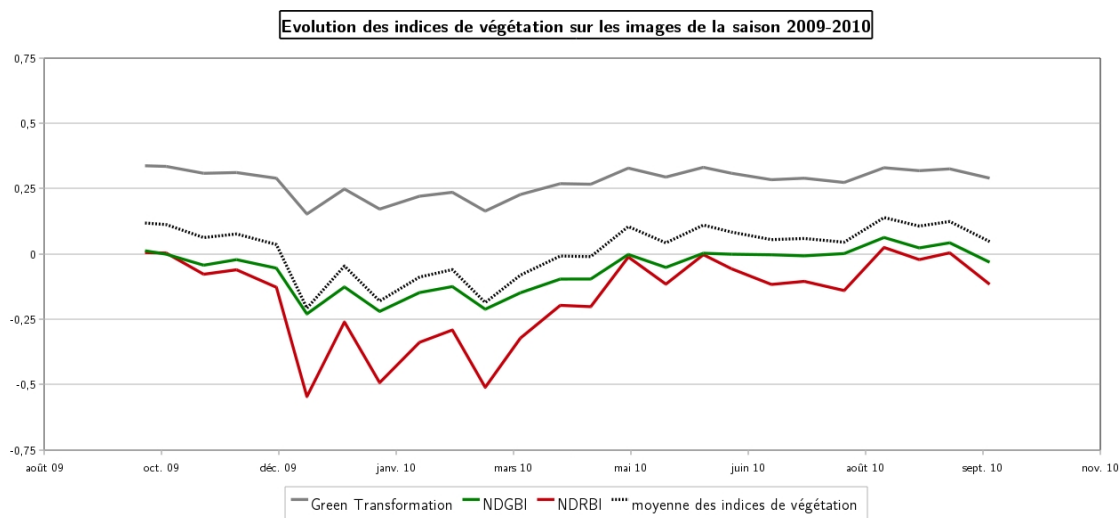


FIG. 10.12: Calcul des indices de végétation pour la saison 2009-2010 sur le site du refuge Jean-Collet

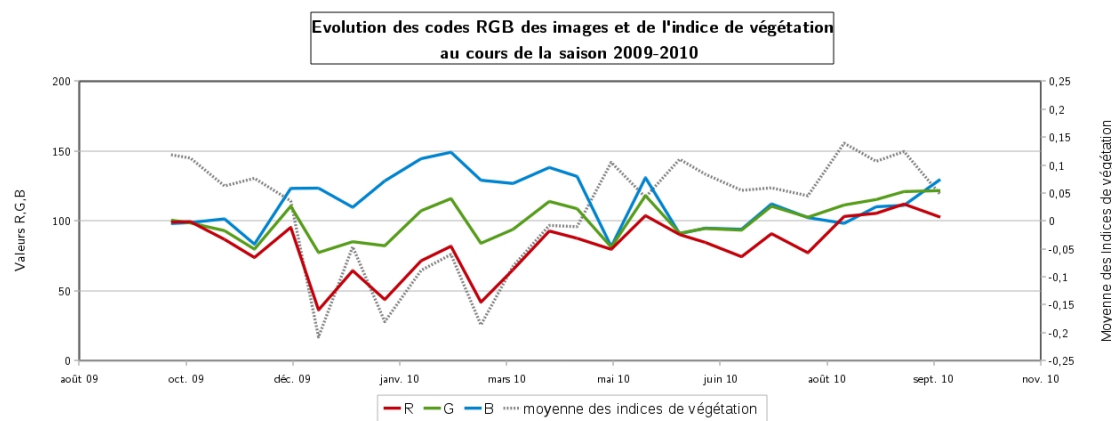


FIG. 10.13: Evolution des caractéristiques RGB de l'image et indice de végétation correspondant

On peut observer sur cette figure trois phases distinctes pour chacun des indices. Une première phase de octobre à décembre, avec des indices plutôt élevés, correspondant à un bassin versant non enneigé et une végétation automnale. Durant tout la saison hivernale, les indices sont relativement faibles en raison de la présence de neige, puis, à partir des mois d'avril/mai, on observe une hausse de l'indice de végétation qui se poursuit durant l'été. On peut également mettre en évidence le caractère pertinent de l'utilisation d'un indice moyen (moyenne des trois indices précédent) pour caractériser le cycle végétatif.

10.2. ETUDE DE PHÉNOMÈNES PHYSIQUES SPÉCIFIQUES :

10.2.2.2 Indice de végétation et cycle végétation au Refuge Jean-Collet :

a) Evolution générale du cycle végétatif :

Afin de vérifier le bien fondé de notre technique, nous avons calculé l'indice de végétation sur l'ensemble des images du Refuge Jean-Collet. Les résultats sont présentés dans le graphique suivant (10.14).

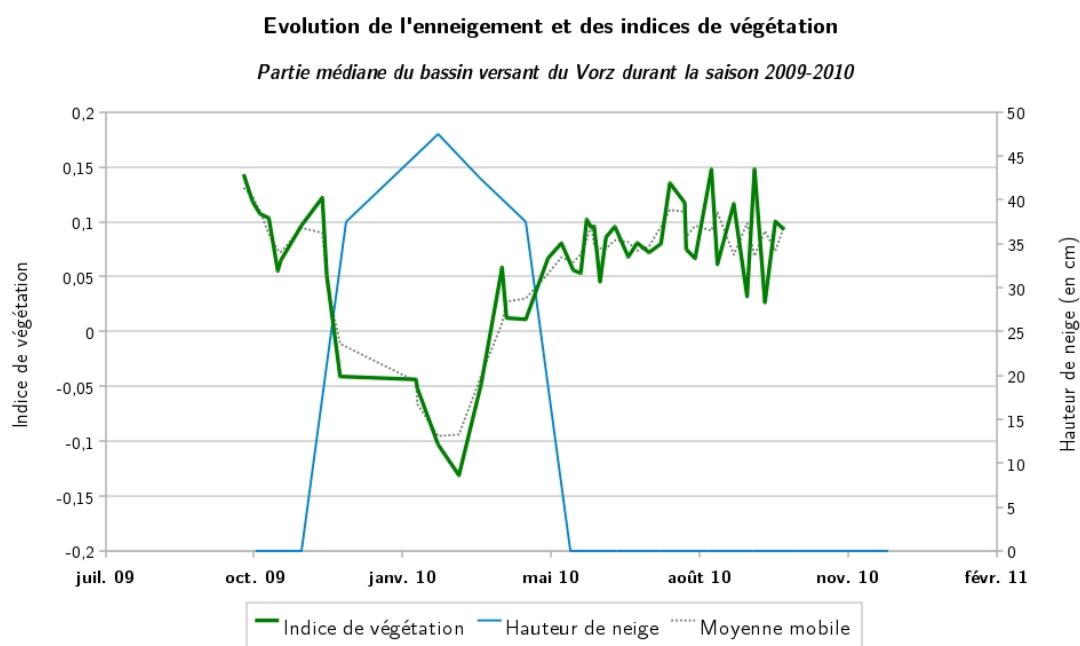


FIG. 10.14: Indice de végétation et niveau d'enneigement au Refuge Jean-Collet (saison 2009-2010)

L'indice de végétation montre une excellente corrélation avec les hauteurs de neige relevées à la station du Pleyonet. Ainsi, durant la saison hivernale, les indices sont faibles, puis ils remontent progressivement au printemps après la fonte des neiges. Les valeurs maximum de l'indice sont atteintes pour le mois d'août, ce qui est cohérent pour des altitudes voisines de 2000 mètres en zone de montagne. Les quelques pics observés par la suite correspondent essentiellement à des "reverdissements" post-précipitations (octobre & novembre notamment).

b) Détermination des périodes de floraison :

Le point de vue du Refuge Jean-Collet permet d'observer des altitudes comprises entre environ 1600 et 2600 mètres. Nous sommes ici dans l'étage subalpin pour la partie inférieure et la partie médiane, et dans l'étage alpin pour la partie supérieure. Ainsi, au niveau du replat du Mousset (1700 mètres) on peut observer un couvert forestier "clairsemé" (épicéa, mélèze,...), ainsi qu'une transition progressive vers l'étage alpin (arbrisseaux, rhododendron,...) composé essentiellement de pelouses. Une information utile dans le cadre de la modélisation hydrologique serait de connaître la date de floraison des différentes espèces, afin de pouvoir déterminer les périodes durant lesquelles le contenu en eau du sol sera particulièrement sollicité par la végétation en place.

CHAPITRE 10. UTILISATION ALTERNATIVE DU CAPTEUR SNODEC :

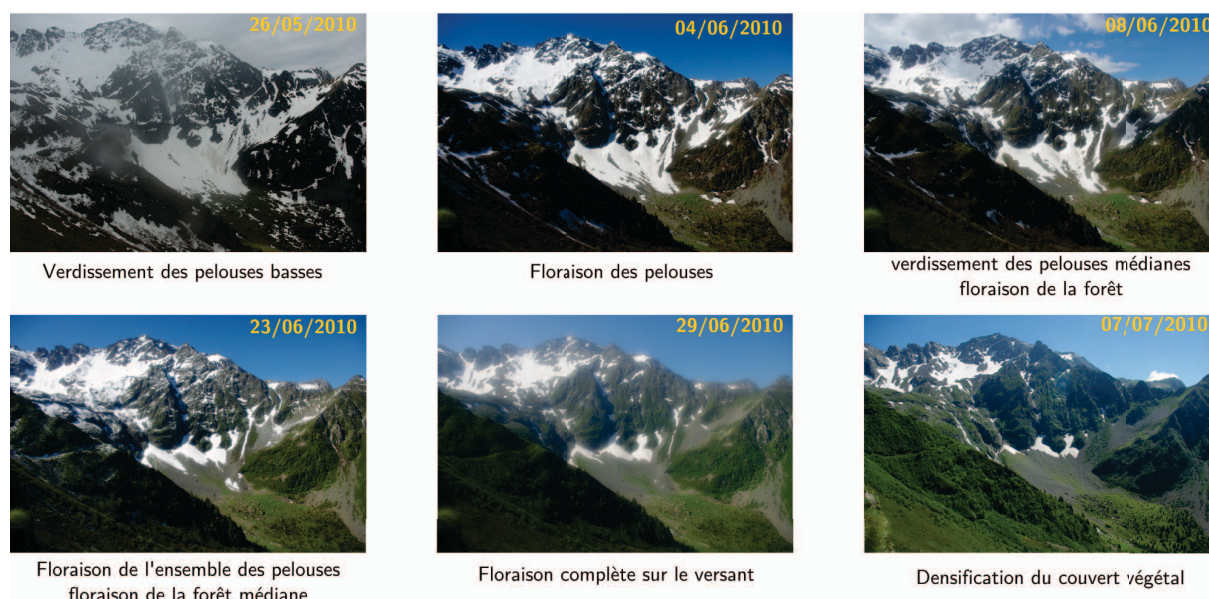


FIG. 10.15: Période de floraison dans la partie médiane du bassin versant du Vorz

c) *Evolution de la végétation dans la partie supérieure du bassin versant du Vorz :*

Dans la partie supérieure du bassin versant, on se trouve dans l'étage alpin (pelouses alpines,...), puis on observe la transition vers l'étage nival dans lequel on ne trouve plus aucune trace de végétation. Les images suivantes permettent de reconstituer la période de décroissance de la végétation qui se produit au cours des mois de septembre et octobre. Ainsi, on assiste à un brunissement généralisé et progressif de la végétation, en fonction essentiellement de l'altitude, et ce, avant la chute des premières neiges pour l'année étudiée (2010), bouclant le cycle végétatif annuel.

10.2. ETUDE DE PHÉNOMÈNES PHYSIQUES SPÉCIFIQUES :

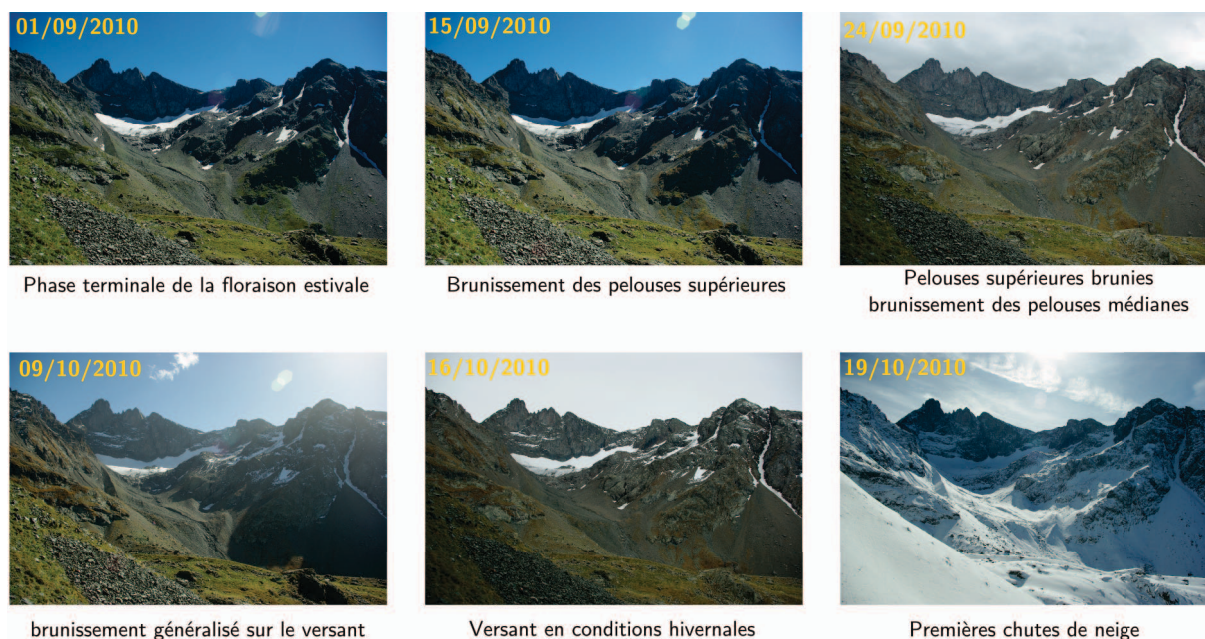


FIG. 10.16: Période de décroissance de la végétation sur le Vorz.

L'ensemble de ces rapides analyses nous conforte dans le fait qu'il est possible d'utiliser les images destinées à la détection de la neige pour estimer l'état du couvert végétal sur le bassin versant, et mieux analyser le cycle végétatif. Les informations extraites des images peuvent donner quelques clefs importantes quand à la disponibilité en eau dans le sol, en fonction de l'absorption de l'eau par les plantes dans une phase de croissance importante par exemple. Ainsi, cette méthode pourrait constituer une bonne alternative pour contraindre les modèles d'évapotranspiration pour lesquels nous ne disposons pas de données conséquentes, dans le cadre de nos travaux en zones de haute montagne.

Cependant, à l'image de ce que nous avons déjà suggéré pour l'estimation des zones enneigées, le recours à un filtre infra-rouge améliorerait considérablement l'analyse de la végétation. En effet, il serait ainsi possible d'utiliser les indices de brillance, et de végétation, utilisés traditionnellement en télédétection et donnant des résultats bien plus précis.

CHAPITRE 10. UTILISATION ALTERNATIVE DU CAPTEUR SNODEC :

Section 10.3

Application à différents sites de mesure :

Avant la mise en place du capteur SnoDEC sur le bassin versant du Vorz, d'autres systèmes de photographies ont été mis en place par d'autres équipes du laboratoire pour observer le milieu de montagne, et l'évolution de son environnement en continu. Ainsi, le bassin versant d'Anterne possédait deux appareils photographiques depuis 2007 ; et, leurs images ont d'ailleurs été utilisées au début de l'implémentation du logiciel de traitement 3D, et dans la réalisation des tests de détection automatique de l'enneigement. Nous disposons ainsi de deux sites pour lesquels une chronique de 2 saisons était disponibles :

- La Pointe d'Anterne (2550 mètres) :
2 images (5MPix) par jour depuis Octobre 2007
Vue : Lac d'Anterne et exutoire du bassin (vue plongeante)
- Le Lac d'Anterne (2160 mètres) :
2 images (5MPix) par jour depuis Octobre 2007
Vue : Haut du bassin (vue en contre-plongée)

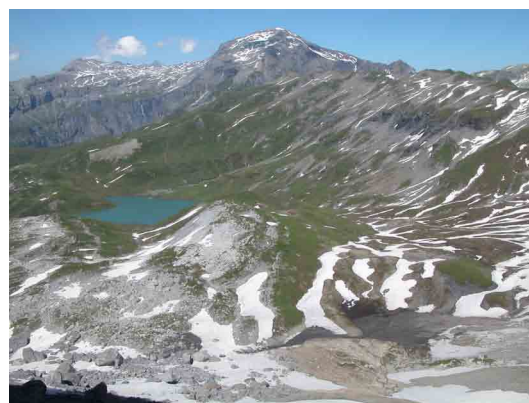


FIG. 10.17: Images issues des sites de Anterne équipés d'appareil photographiques automatiques

10.3. APPLICATION À DIFFÉRENTS SITES DE MESURE :

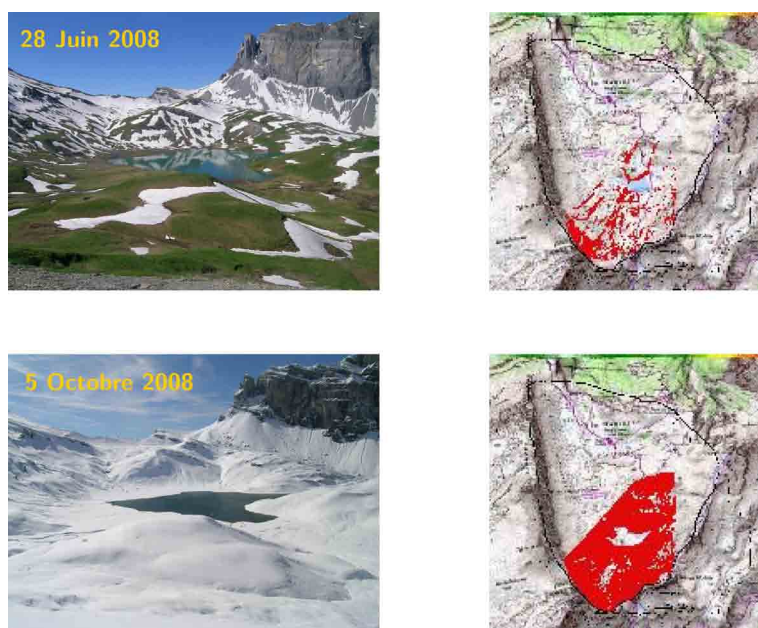


FIG. 10.18: Exemples de cartographies d'enneigement sur le site de Anterne

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 10 :

Nous mettons ici en lumière la grande polyvalence du système SnoDEC. En effet, l'objectif initial était de caractériser et de quantifier la couverture nivale des bassins versants, mais avec ce système, on met à profit l'imagerie pour analyser de nombreux autres phénomènes naturels. Il est donc envisageable moyennant quelques travaux d'adaptation et d'amélioration, d'utiliser le capteur pour d'autres applications et d'autres disciplines.

Au niveau de la neige, on a vu dans les chapitres précédents que l'on pouvait obtenir des cartographies d'enneigement précises. Cependant, une information essentielle est la hauteur de neige (ainsi que sa structure), qui permet de calculer les équivalents en eau à la surface des bassins versants. Dans cette optique, nous avons essayé d'utiliser nos images pour détecter des hauteurs de neige. Bien que nous soyons limités par la résolution des appareils photographiques, nous avons en plusieurs points du bassin établi des chroniques de hauteurs qui pourront être utilisées et améliorées par la suite.

L'observation des glaciers se fait traditionnellement par satellite, mais l'idée d'utiliser ce type de capteur permettrait d'atteindre des précisions très fines, et des informations sur l'évolution de la couverture du glacier par exemple (neige, glace, débris,...) au cours de la saison. A partir de nos images, nous avons pu déterminer des vitesses d'écoulements, ainsi que des distances d'ablation, ce qui est très intéressant dans l'optique de la prise en compte du glacier dans les modélisations hydrologiques.

L'évapotranspiration joue un rôle important dans les bilans hydrologiques et est essentiellement liée à la végétation. Quantifier cette végétation, en particulier durant ses périodes de floraison, de développement et de disparition permettrait de déterminer avec précision les périodes où l'évapotranspiration est maximale. Cette opération semble comme nous l'avons montré réalisable avec notre système, qui a mis en évidence avec succès, moyennant des algorithmes standard de télédétection, les périodes "d'efficacité" de la végétation sur le bassin versant.

Pour finir, le système SnoDEC est largement transposable à d'autres bassins versants, comme cela est le cas pour Anterne, qui a d'ailleurs servi de site pilote dans la détection des surfaces enneigées et de l'établissement des algorithmes de passage vers la 3D.

Le système SnoDEC est donc un élément clef de l'instrumentation de notre bassin versant. Il sera utilisé dans bien des situations et nous permettra de contrô-

10.3. APPLICATION À DIFFÉRENTS SITES DE MESURE :

ler certaines estimations qui pourront être faites par extrapolation. La plupart des travaux effectués par la suite s'appuieront sur ce système, comme nous le verrons dans la troisième partie de ce mémoire, notamment lors de l'extrapolation des précipitations, températures et de l'étude de la possibilité de contraindre les modèles hydrologiques à partir de notre réseau de mesure.

Troisième partie:

Modélisation de l'hydrométéorologie en montagne :

Chapitre 11:

Estimation des pluies sur le bassin versant :

Sommaire du Chapitre:

11.1 Particularité du régime pluviométrique local :	265
11.1.1 Problème du fonctionnement du réseau en hiver :	265
11.1.2 Spécificité des événements intenses locaux :	266
11.1.3 Un gradient orographique particulier :	268
11.2 Utilisation de données alternatives pour recalibrer le réseau :	270
11.2.1 Utilisation des totalisateurs :	270
11.2.2 Intégration de la station de Chamrousse :	270
11.3 Méthodes d'estimation des précipitations locales :	277
11.3.1 Variabilité temporelle de la méthode :	277
11.3.2 Techniques d'estimations spatiales :	278
11.4 Génération des précipitations spatiales sur le Vorz :	282
11.4.1 Episode neigeux "hivernal" du 15 Mai 2010 :	282
11.4.2 Episode estival "orageux" du 5 Aout 2010 :	283
11.4.3 Episode printannier "pluvieux intense" du 31 mai 2011 :	283

Introduction du Chapitre 11 :

La pluie est l'un des paramètres météorologiques le plus variable à prendre en compte dans l'analyse des bassins versants de montagne. Sur le bassin versant du Vorz, nous sommes soumis à une difficulté supplémentaire, celle de la dualité des précipitations sous forme de pluie ou de neige. Cette caractéristique renforce la complexité d'estimer les précipitations sur le bassin, d'autant plus que nous ne disposons que de 3 stations pour lesquelles les pluviomètres ne sont pas chauffants. La pluviométrie doit être estimée de manière relativement précise lorsque l'on traite de problèmes d'hydrologie en montagne. Il sera donc nécessaire de développer des méthodes permettant de réaliser cette tâche de manière satisfaisante. Dans la plupart des cas, on utilise des tendances générales sur le bassin versant, pour les extrapoler sur l'ensemble de la surface. Cependant, compte tenu des spécificités de notre réseau, nous souhaiterions obtenir une estimation de la pluie en tout point du bassin avec des échelles spatiales relativement fines pour les événements estivaux et plus globale pour les chutes de neige hivernales qui sont plus homogènes. Ainsi, nous allons être confrontés aux multiplicités d'échelles à la fois temporelles et spatiales.

La première problématique développée dans ce chapitre portera donc sur la caractérisation de la pluviométrie sur le bassin versant du Vorz. Cette étude devra se faire à différentes échelles temporelles et spatiales, en raison de la variabilité de la pluie. Ce sera ici l'occasion d'essayer de mettre en évidence des relations orographiques ou morphologiques entre les différentes stations de mesures. Dans un second temps, on verra quelles sont les possibilités d'intégration de stations supplémentaires au réseau, et, de quelle manière cette intégration peut se faire lors de la création des cartographies pluviométriques du bassin. Enfin, au moyen de quelques épisodes remarquables, nous présenterons la méthodologie de l'interpolation des températures que nous avons développée.

CHAPITRE 11. ESTIMATION DES PLUIES SUR LE BASSIN VERSANT :

Section 11.1

Particularité du régime pluviométrique local :

On a vu dans le *chapitre 4* les premiers résultats du réseau de mesures pluviométriques du Vorz. Sa position en altitude lui confère des particularités spécifiques, notamment dans l'optique de son fonctionnement en période hivernale, avec l'utilisation de pluviomètres non chauffants. L'implantation des trois pluviomètres a été réalisée de manière à échantillonner au mieux chacun des trois principaux cirques du bassin versant (Vallon de la Pierre, Lac Blanc, Mousset/Pleynet). Ils ont ainsi mis en évidence des comportements très différents, en particulier durant les événements intenses. Enfin, le gradient orographique traditionnellement considéré comme positif avec l'altitude (*Sauquet, 2000, [103]* ; *Graff, 2004, [48]*), montre dans le cas de nos totalisateurs des différences notables. L'ensemble de ces paramètres entraîne de fortes difficultés pour l'estimation des pluies sur l'ensemble du bassin versant.

11.1.1 Problème du fonctionnement du réseau en hiver :

Les pluviomètres installés sur le versant sont des pluviomètres à augets basculants simples, ne possédant pas de système de chauffage. En conséquence, ils sont inefficaces durant la majeure partie de l'hiver. Nous ne disposerons donc d'aucune information sur les chutes de neige horaires ou journalières, puisque les données ne pourront être considérées comme valables, du fait du stockage de la neige dans le réceptacle et parfois même de sa fonte directe et différée dans celui-ci. De même, certaines "pseudo-pluies" observées durant la période hivernale peuvent être le résultat d'une fonte de la neige stockée dans le pluviomètre. En considérant ces phénomènes, il est possible de donner une estimation grossière du taux d'utilisation possible des pluviomètres, comme le montre le tableau 11.1.

Pourcentage des journées où la température est supérieure à 0°C de moyenne			
Station du Pleynet (1360 mètres)	Station du Refuge (2060 mètres)	Station du Lac Blanc (2230 mètres)	Station de Chamrousse (1785 mètres)
67%	61%	54%	66%

TAB. 11.1: Estimation de la fonctionnalité des pluviomètres du Vorz

Ce tableau met en évidence des capacités d'utilisations limitées. En effet, si on considère uniquement les pluies enregistrées en période de faible probabilité de neige (température au dessus de 0°C), on obtient des taux de fonctionnement potentiels proches de seulement 50 à 60% de l'année. De plus, on notera que ce taux diminue avec l'altitude, ce qui complexifie encore la situation, puisque pour certains épisodes, les données seront exploitables ou non suivant la position sur le bassin versant. On notera également dans ce tableau le fait que les taux des stations du Pleynet et de Chamrousse sont relativement proches alors que leur altitude diffère (1785 mètres à Chamrousse contre 1440 mètres au Pleynet). On retrouve ici un élément marquant qui est l'encaissement de la station du Pleynet entraînant la présence de températures plus faibles que la moyenne générale à cette altitude.

11.1. PARTICULARITÉ DU RÉGIME PLUVIOMÉTRIQUE LOCAL :

11.1.2 Spécificité des évènements intenses locaux :

Outre le problème de l'inopérabilité du réseau durant la période hivernale, la spécificité du milieu dans lequel nous évoluons se manifeste par des évènements pluvieux intenses, pour lesquels nous disposons d'enregistrements fiables (estivaux). Le tableau 11.2 présente les 10 évènements les plus marquants que nous avons enregistrés depuis la mise en place du réseau sur le Vorz. Pour chaque évènement, les mesures aux 3 stations du Vorz et à la station de Chamrousse sont présentées, ainsi que la température observée sur le bassin (Lac Blanc), afin de déterminer la probabilité de présence de précipitation neigeuse, et les valeurs pluviométriques de la station de montagne la plus proche (Chamrousse).

<i>Date</i>	<i>Pleynet</i>	<i>Refuge</i>	<i>Lac Blanc</i>	<i>Chamrousse</i>	<i>Température Lac Blanc</i>
30 mai 2010	44,6 mm	46,0 mm	55,3 mm	50,6 mm	3,8°C
13 juin 2010	44,8 mm	51,0 mm	27,3 mm	9,4 mm	6,9°C
22 juil. 2010	34,8 mm	29,8 mm	25,5 mm	29,8 mm	12,7°C
2 août 2010	31,2 mm	27,5 mm	22,1 mm	5,6 mm	9,6°C
5 août 2010	54,9 mm	61,5 mm	71,8 mm	25,4 mm	2,7°C
24 sept. 2010	40,4 mm	31,4 mm	16,1 mm	25,2 mm	3,4°C
25 sept. 2010	30,0 mm	15,1 mm	0,0 mm	25,0 mm	-0,8°C
31 mai 2011	71,6 mm	47,0 mm	35,8 mm	49,0 mm	3,2°C
16 juin 2011	32,8 mm	37,8 mm	37,6 mm	18,6 mm	8,8°C
18 juin 2011	31,2 mm	32,8 mm	32,2 mm	14,8 mm	5,2°C

TAB. 11.2: Principaux évènements pluvieux "estivaux" sur le Vorz

Les évènements que nous avons retenus sont des évènements journaliers, c'est-à-dire des jours durant lesquels les cumuls sont conséquents, mais les intensités ne sont pas forcément les plus importantes enregistrées dans la chronique (entre 8 et 10 mm/h pour les évènements les plus intenses). Il ressort d'une analyse approfondie que d'une part ces évènements journaliers comprennent la plupart des fortes intensités (par exemple le 13 Juin 2010, 27 mm/h au Pleynet). En outre, ce sont également ces évènements qui ont eu le plus d'impact sur les débits du Vorz (contrôle visuel sur l'ensemble des données HyMAGE) durant cette période.

Parmi les évènements que l'on a retenus, on observe que deux atteignent des cumuls journaliers de plus de 70 mm à la station du Pleynet, et au Lac Blanc. La plupart des autres évènements sont compris entre 30 et 60 mm, avec cependant de fortes variabilités pouvant être observées à l'échelle d'une même journée entre les stations.

Les mesures de températures sont réalisées au Lac Blanc et permettent de juger du caractère potentiellement neigeux des précipitations. Ici, un seul cas est clairement neigeux à la hauteur du Lac Blanc (25 Septembre 2010), avec une température journalière négative et un enregistrement nul de précipitations, tandis que dans la partie basse on observe des cumuls raisonnables. Pour un second évènement, le 31 Mai 2011, on peut également douter de la pertinence des enregistrements journaliers, puisque les cumuls de la partie basse atteignent 70 mm, tandis qu'au lac Blanc la température est proche de 0 et les cumuls sont plus faibles. La température étant une moyenne journalière, il est possible qu'à un moment de la journée (soir ou matin), celle-ci soit descendue en dessous de 0°C et que des chutes de neiges se soient produites dans la partie haute. On voit bien par ces enregistrements la difficulté de prendre en compte ou non les différentes données dont on dispose, qui peuvent être variables à l'intérieur d'un même épisode.

Initialement, on considèrerait que sur le Vorz, lors des épisodes intenses, les précipitations

CHAPITRE 11. ESTIMATION DES PLUIES SUR LE BASSIN VERSANT :

maximales étaient enregistrées dans la partie haute du versant, en particulier pour les événements estivaux comme ceux qui sont présentés dans le tableau. Il ressort cependant, qu'il est extrêmement difficile de mettre ce phénomène en évidence avec les données dont nous disposons. La figure 11.1 permet d'observer les variabilités intra-événement entre les différentes stations. On a coutume de considérer que durant des événements pluvieux en montagne, les

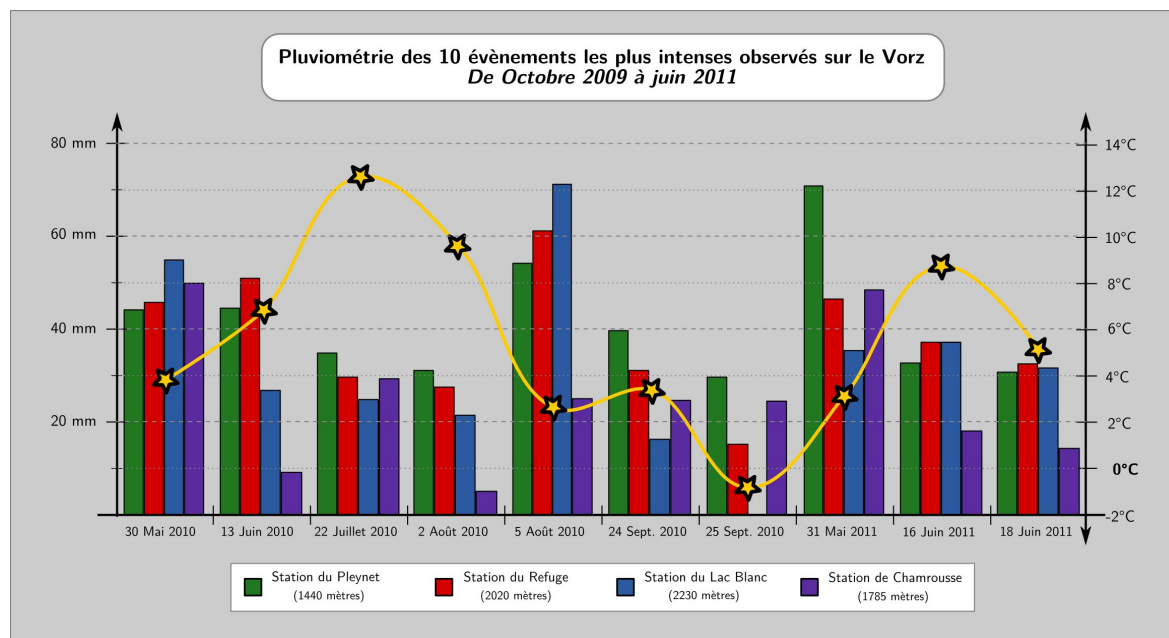


FIG. 11.1: 10 événements les plus intenses sur le Vorz au niveau des stations météorologiques et comparaison avec la station de Chamrousse

précipitations maximum se produisent sur la partie haute du versant. Dans ce cadre, on détermine souvent un gradient orographique (*Koscielny, 2006, [69]* et *Cojean et al., 1999, [24]*) pour extrapoler les précipitations à partir des stations. Cependant, dans notre cas, on constate qu'il sera probablement délicat de réaliser une telle opération, au vu de ce que l'on observe en particulier sur le graphique 11.1. En effet, il ne semble se dégager aucune tendance nette entre les différents épisodes pluvieux correspondant à une échelle de temps courte répertoriés dans le tableau. En revanche, sur des échelles de temps plus longues (mensuelles, saisonnières), il peut se dégager des similarités entre les stations.

A l'échelle de l'analyse, et de la modélisation des crues, cette problématique sera moindre du fait du déroulement de ces événements essentiellement en période estivale, où les précipitations sont généralement liquides. On contrôlera alors simplement leur typologie à l'aide des thermomètres placés au niveau des pluviomètres, et, on pourra utiliser des données précises provenant de nos stations. En réalité, la réelle problématique va apparaître lors des modélisations nivologiques, lorsque nous aurons besoin d'estimer des chutes de neige journalières. Pour cela, nous envisageons d'utiliser un gradient orographique classique, à certains pas de temps, à partir de données météorologiques de plaine, mais, il semble que cela soit peu évident. A cette occasion, nous allons donc explorer l'existence d'une corrélation générale entre les stations du bassin durant l'année et les différentes saisons à différents pas de temps.

11.1. PARTICULARITÉ DU RÉGIME PLUVIOMÉTRIQUE LOCAL :

11.1.3 Un gradient orographique particulier :

Le gradient orographique est souvent utilisé pour extrapoler les précipitations en montagne (Valery, 2010, [117]). Dans notre cas, nous avons tenté de mettre en évidence un tel gradient à partir de notre base de données. Malheureusement, il ressort de l'ensemble des analyses des événements au pas de temps horaire et journalier qu'aucun gradient systématique et régulier n'a pu être mis en évidence de manière claire. On observe malgré tout la mise en place de gradients ponctuels lors de certains épisodes horaires ou journaliers au niveau local. En conséquence, durant la période hivernale, nous avons utilisé les totalisateurs pour travailler au pas de temps saisonnier. Les relevés effectués par ces totalisateurs sont présentés dans le tableau 11.3.

A partir des évolutions saisonnières des cumuls des totalisateurs, il est possible d'essayer

Enregistrement des totalisateurs			
Date	Pleynet (1440 mètres)	Refuge (2020 mètres)	Lac Blanc (2230 mètres)
7 Oct. 2009	0 cm	0 cm	0 cm
27 Mai 2010	140 cm	134 cm	114 cm
6 Juil. 2010	75 cm	24 cm	28 cm
19 Oct. 2010		60 cm	54 cm
22 Jun. 2011	140 cm	*** cm	106 cm
Total	339 cm	*218* cm	302 cm

TAB. 11.3: Mesures des totalisateurs sur les 3 sites du Vorz

de mettre en évidence une tendance dans la typographie des précipitations (cf tab.11.4). De manière générale, on peut dégager quelques tendances saisonnières de l'évolution du gradient. Durant la période hivernale, il semble qu'il soit négatif, c'est-à-dire qu'il neige plus au Pleynet qu'au lac Blanc (140 cm au Pleynet contre 110 cm au Lac Blanc en moyenne sur les deux saisons). Pendant la période estivale, la situation est plus homogène, et la tendance est à un gradient légèrement positif (75cm au Pleynet contre 85 cm au Lac Blanc et Refuge). De fait, il apparaît que l'endroit le plus pluvieux du bassin versant semble être la station du Pleynet. Cette observation rejoint d'ailleurs les idées que nous avons déjà développées précédemment, à savoir que les précipitations sont plutôt contraintes par la morphologie du site, plutôt que par l'altitude.

Gradient orographique			
Date	Gradient Pleynet / Refuge	Gradient Pleynet / Lac Blanc	Gradient Refuge / Lac Blanc
7 Oct. 2009	-	-	-
27 Mai 2010	-10,3 mm/100m	-33,0 mm/100m	-95,3 mm/100m
6 Juil. 2010	15,5 mm/100m	8,9 mm/100m	19,0 mm/100m
19 Oct. 2010			-28,6 mm/100m
22 Jun. 2011	*** mm/100m	-22,8 mm/100m	*** mm/100m
Général	5,2 mm/100m	-46,8 mm/100m	-104,8 mm/100m

TAB. 11.4: Calcul du gradient orographique à partir des 3 totalisateurs du Vorz

Le tableau 11.4 présente les valeurs des gradients orographiques calculés selon différentes périodes entre les 3 stations du bassin versant. Ainsi, il est évident qu'il n'est pas possible de mettre en évidence un gradient global unique, que ce soit sur l'ensemble de la période, ou

CHAPITRE 11. ESTIMATION DES PLUIES SUR LE BASSIN VERSANT :

sur l'ensemble des stations. Globalement, on peut malgré tout faire le constat que le gradient orographique saisonnier semble généralement négatif durant l'hiver et légèrement positif en été, malgré qu'il reste extrêmement variable. Il conviendra d'utiliser des sources d'informations ponctuelles supplémentaires afin de réaliser l'extrapolation des précipitations.

Ce problème à l'échelle de l'évènement est d'autant plus grand qu'il impact fortement les totaux annuels enregistrés. En d'autre termes, il devient essentiel de rechercher une alternative pour évaluer les pluies. Pour cela, nous disposons de deux sources d'informations complémentaires :

- L'utilisation des totalisateurs pour recalculer les totaux annuels
- L'intégration des données d'une station située à proximité (Chamrousse)

Section 11.2

Utilisation de données alternatives pour recaler le réseau :

11.2.1 Utilisation des totalisateurs :

Les totalisateurs à neige ont été positionnés à proximité des stations de manière à réaliser un contrôle des enregistrements pluviométriques. Dans ce cadre, les différences entre les cumuls enregistrés par les pluviomètres, et ceux mesurés dans les totalisateurs doivent en théorie être relativement proches. Cependant, la présence de pluviomètres non-chauffants induit des erreurs de mesures durant l'hiver, et, en conséquence, les totalisateurs nous permettent de connaître les cumuls annuels et saisonniers sur ces zones, et éventuellement de recalibrer nos mesures. Les différences relevées entre les pluviomètres et les totalisateurs sont présentées dans le tableau 11.5.

Différence entre Pluviomètre et Totalisateur			
Date	Station du Pleynet	Station du Refuge	Station du Lac Blanc
07/10/09	0	0	0
27/05/10	72,25 %	56,1 %	41,2 %
22/10/10	107,0 %	94,9 %	97,6 %
22/06/11	71,9 %	***	50,6 %

TAB. 11.5: Calcul des différences entre pluviomètre et la référence du totalisateur pour chaque site

Ce tableau met en évidence les différences de mesures entre la station et le totalisateur, en prenant celui-ci comme référence, puisqu'il est à-priori celui pour lequel on a la meilleure précision. Ainsi, des erreurs de mesures conséquentes sont constatées durant la période hivernale, mais, au cours de l'été les différences sont très faibles (inférieures à 10%). La distinction entre les mesures est donc contrôlée essentiellement par la température. On pourra donc utiliser les données climatiques pour déterminer si les données du pluviomètre sont exploitables ou non. Cette opération pourra être réalisée au pas de temps journalier ou horaire.

11.2.2 Intégration de la station de Chamrousse :

La solution proposée par les totalisateurs permet de déterminer les jours pour lesquels les données pluviométriques sont utilisables, et de recalibrer les cumuls saisonniers hivernaux. Malgré tout, il sera impossible durant toute cette période de connaître les modalités de déroulement des chutes de neige, ce qui peut s'avérer très problématique pour estimer l'évolution du manteau neigeux. Ainsi, il devient donc nécessaire de trouver une source de données alternative. Dans notre cas, nous disposons sur le massif de Belledonne de la présence d'une station météorologique de référence à Chamrousse. Celle-ci va nous permettre de connaître les précipitations journalières durant l'hiver. Cependant, il devient nécessaire de définir la relation entre la pluviométrie à Chamrousse et la pluviométrie sur nos différentes stations de mesure, ainsi que la cohérence des mesures réalisées.

CHAPITRE 11. ESTIMATION DES PLUIES SUR LE BASSIN VERSANT :

11.2.2.1 Cohérence générale des mesures des stations :

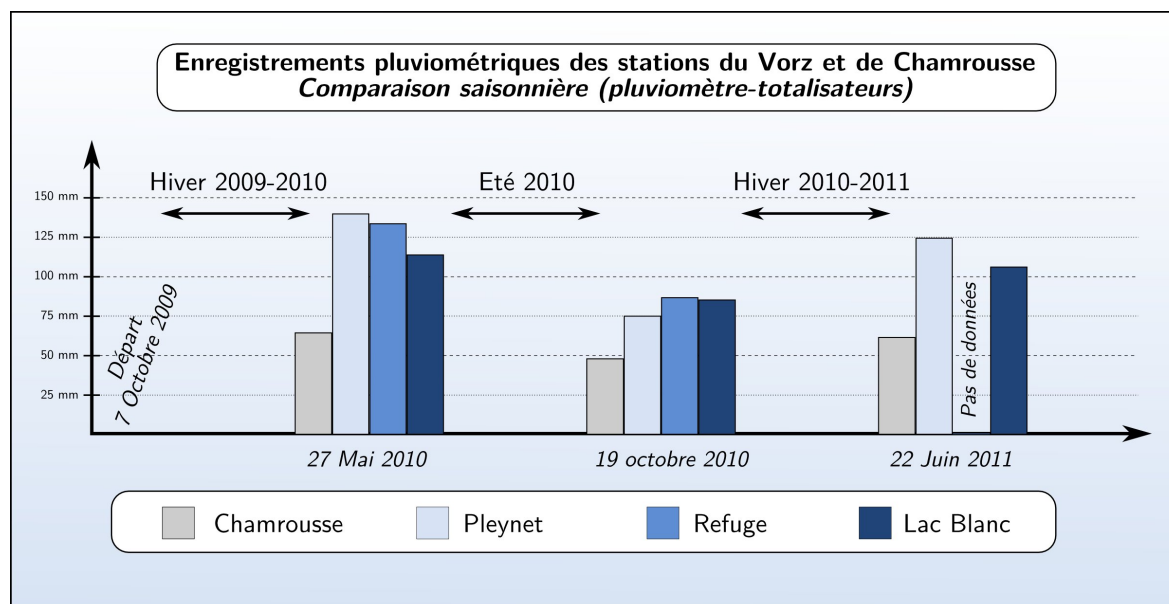


FIG. 11.2: Comparaisons des enregistrements pluviométriques saisonniers de Chamrousse et des totalisateurs du Vorz

Relations pluviométriques entre Chamrousse et les stations du Vorz			
Date	Pleynet/Chamrousse	Refuge/Chamrousse	Refuge/Chamrousse
07/10/09	0	0	0
27/05/10	2,2	2,1	1,8
06/07/10	1,6	1,45	1,7
19/10/10	2,0	1,9	1,7
22/06/11		-	1,7
Total	1,9	1,8	1,75

TAB. 11.6: Présentation des relations pluviométriques saisonnières entre les stations

Le tableau 11.6 et la figure 11.2 présentent les relevés pluviométriques réalisés sur les totalisateurs, et les valeurs enregistrées durant le même intervalle de temps à la station de Chamrousse. Dans un premier temps, on constate que les cumuls relevés à Chamrousse sont bien inférieurs à ceux relevés sur le Vorz, et ce, même pour la station du Pleynt située à une altitude inférieure. Ce phénomène vient une nouvelle fois confirmer le fait que l'évolution des précipitations reflète plus la position locale dans le massif et le type de temps, que l'élévation en altitude, du moins en ce qui concerne la tendance générale.

Le tableau est le résultat de l'analyse du graphique en terme d'importance des précipitations, c'est-à-dire qu'il représente les relations entre la station de Chamrousse et nos différents totalisateurs. Ainsi, on semble mettre en évidence une certaine homogénéité dans le comportement de la relation liant chaque station à la référence de Chamrousse. De manière générale, on observe que le ratio entre les cumuls du totalisateur et la station de Chamrousse sur la même période sont relativement homogènes pour un site donné. De fait, il semble alors possible de corroborer les résultats de nos totalisateurs, et, de compléter nos manques de données à partir

11.2. UTILISATION DE DONNÉES ALTERNATIVES POUR RECALER LE RÉSEAU :

de ce coefficient liant les stations. Cependant, pour mener cette opération, il convient de s'assurer que ces résultats se retrouvent dans les précipitations à faible pas de temps (journalier). Pour cela, on utilisera les pluviomètres du Vorz et on les comparera à celui de Chamrousse durant la partie de la saison où nous disposons de données, à savoir la saison estivale.

11.2.2.2 Analyse de la cohérence des stations sur des événements journaliers :

Nous venons de voir qu'il est possible d'extrapoler les précipitations saisonnières sur le Vorz à partir de la station de Chamrousse. Dans ce cadre, nous allons maintenant déterminer si la même technique peut être appliquée aux pluies journalières. Pour cela, nous allons nous intéresser aux données des pluviomètres. En raison de leur inopérabilité durant les épisodes neigeux, nous ne considérons dans cette étape que les événements se produisant du mois de mai au mois d'octobre, et ce, uniquement si les températures relevées au moment des précipitations sont supérieures à 0°C . Le premier résultat est la comparaison des cumuls entre les stations du Vorz et Chamrousse, présentés dans le tableau 11.7.

Relevés pluviométriques estivaux		
Station	Cumul estival	ratio
Pluviomètre du Pleynet	1362 mm	1,8
Pluviomètre du Refuge	1330 mm	1,76
Pluviomètres du Lac Blanc	1255 mm	1,66
Station de Chamrousse	755 mm	-

TAB. 11.7: Bilan des relevés estivaux (de Mai à Septembre) sur les pluviomètres du Vorz et de Chamrousse

Le tableau 11.7 met en évidence la faiblesse des pluies relevées à Chamrousse comparé au Vorz. De même, durant la période estivale, il semble qu'il existe peu de différence entre les différentes stations du Vorz avec des cumuls allant de 1250 à 1300 mm. Ces cumuls sont calculés à partir des précipitations journalières relevées dans les pluviomètres, et, ils permettent de déterminer une relation entre chaque station du Vorz et la station de Chamrousse. Cependant, ce ratio doit être validé et il devient nécessaire de quantifier les erreurs effectuées sur chaque mesure et leur fréquence, notamment en fonction de la typologie des précipitations et des paramètres climatiques en présence. La table 11.8 montre de quelle manière se répartissent les résultats.

CHAPITRE 11. ESTIMATION DES PLUIES SUR LE BASSIN VERSANT :

Qualité de la relation entre les stations en fonction des vents					
Vent	$P_{Sta} > 0$ et $P_{Cha} > 0$	$P_{Sta} > 0$ et $P_{Cha} = 0$	$P_{Sta} = 0$ et $P_{Cha} > 0$	$P_{Sta} = 0$ et $P_{Cha} = 0$	Total
Est	1	4	0	2	7
Nord	34	26	12	35	107
Ouest	18	10	4	19	51
Sud	22	5	6	8	41
Total	75	45	22	64	206

Estimation de la pertinence de la relation			
Vent	Relation Correcte	Relation Incorrecte	Fréquence de la situation
Est	42,86%	57,14%	3,4%
Nord	64,49%	35,51%	51,94%
Ouest	72,55%	27,45%	24,76%
Sud	73,17%	26,83%	19,9%

TAB. 11.8: Typologie de la relation selon les 4 situations météorologiques possibles entre les stations du Vorz et la Station de Chamrousse

Dans ce tableau, on a pour chaque journée déterminée si les stations mesuraient bien les événements de manières similaires. Les différences mettent ainsi en évidence des conditions météorologiques différentes sur les deux sites. De plus, on a analysé cette différence en fonction des vents, qui trahissent en partie la typologie de la perturbation responsable des hétérogénéités de pluviométrie. Ainsi, on remarque que certains types d'épisodes comme les retours d'est ne sont quasiment jamais observés à Chamrousse tandis qu'ils ont un impact sur le bassin du Vorz. Dans ce type de situation, on aura donc potentiellement des erreurs lors de l'extrapolation des pluies, mais cela ne représente que moins de 5% des cas.

En ce qui concerne les régimes les plus fréquents, on observe essentiellement des courants de nord et ouest, et, durant ceux-ci, la corrélation entre les sites d'observations est relativement bonne. De manière générale, il semble que l'on observe une concordance dans la dynamique météorologique entre le Vorz et Chamrousse dans près de 2 situations sur 3, ce qui reste un taux raisonnable dans l'optique d'une utilisation en extrapolation.

Le tableau 11.9 présente la qualité générale de la relation entre les stations météorologiques du Vorz et celle de Chamrousse. Ces taux sont issus des comparaisons sur l'ensemble des données pour lesquelles la température est positive, et donc où la mesure n'est pas perturbée par la neige. On voit ainsi clairement une similarité qui se dessine entre les deux sites. En effet, de manière générale, le comportement est identique dans près de 75% des cas. Il ressort de cette analyse qu'il devrait être possible d'utiliser la station de Chamrousse pour générer des précipitations journalières. Cependant, dans un souci de précision, cette opération ne sera réalisée que lorsque les pluies journalières ne seront pas exploitables sur le Vorz. De plus, l'ensemble des résultats sera comparé aux mesures effectuées par les totalisateurs afin de confirmer la validité de la relation, cette technique restant une technique complémentaire au réseau de mesure en place.

Pour conclure cette analyse sur les pluies journalières, on peut comparer au moyen de différents graphes les enregistrements pluviométriques journaliers sur le bassin versant du Vorz (cf fig.11.3). La comparaison des stations deux à deux permet de mettre en évidence certaines "affinités" entre elles. On notera que ces graphes permettent de rejeter une hypothèse de relation linéaire claire et précise entre les différentes stations à l'échelle de la globalité des événements. Cependant, comme on l'a vu dans cette section, au niveau journalier, on pourra

11.2. UTILISATION DE DONNÉES ALTERNATIVES POUR RECALER LE RÉSEAU :

Qualité de la relation entre les stations			
	Pluie à la Station	Pas de Pluie à la Station	Total
Pluie à Chamrousse	36,89%	4,85%	41,75%
Pas de Pluie à Chamrousse	19,74%	38,51%	58,25%
Total	56,63%	43,37%	100%

TAB. 11.9: Cohérence de la pluviométrie entre la station de Chamrousse et les stations du Vorz

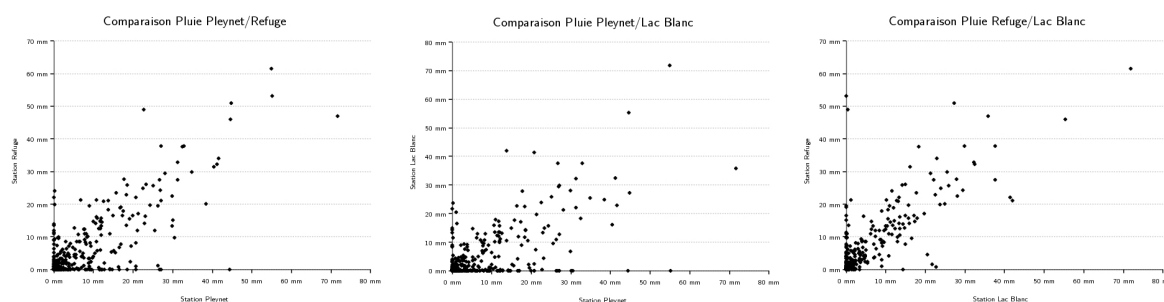


FIG. 11.3: Comparaisons des pluies journalières entre les différentes stations

extrapoler les relations entre les stations sans introduire d'erreurs majeures.

A l'observation de ces graphes, on constate que la relation liant les stations du Lac Blanc et du Pleynet est faible. En revanche celle reliant le lac Blanc/Refuge et celle entre le Refuge/Pleynet sont plus marquées. On pourrait en déduire qu'il existe dans un premier temps une relation orographique entre les stations. Mais, si l'orographie était le seul paramètre entrant en compte, le lien entre le Lac Blanc et le refuge serait plus important que celui entre le Refuge et le Pleynet, ce qui ne semble pas être le cas. Un autre paramètre entre en jeu : la position dans le bassin versant.

11.2.2.3 Vérification de l'extrapolation des pluies journalières sur le Vorz à partir de la station de Chamrousse :

A l'image des analyses des précipitations journalières entre stations du Vorz, le même travail peut être effectué avec la station de Chamrousse, dont les résultats sont présentés dans la figure 11.4. Ces différents graphes mettent en évidence qu'il n'y a pas de relation générale entre les stations, mais il existe une certaine corrélation qui peut être utilisée par la suite. A l'échelle journalière, on a montré que la cohérence entre les stations était bonne, et, il pourra être établi, à défaut d'une relation systématique entre les stations, une correction pluviométrique qui permettra de déterminer les précipitations sur les stations du Vorz à partir des données de Chamrousse lorsque cela sera nécessaire (période hivernale).

La relation météorologique existante entre les différentes stations ayant été mise en évidence, il convient maintenant d'essayer de l'utiliser et d'en valider son fonctionnement. Pour cela, on va considérer toutes les données pour lesquelles la température est positive, par souci de ne pas impacter l'évolution par des erreurs de mesures dues à l'enneigement. Puis, on va calculer la valeur probable à partir de l'estimation depuis Chamrousse, et de la comparer à la valeur théorique mesurée à chaque station (mesure des pluviomètres). Ce procédé sera utilisé pour chaque journée, pour les 3 stations du Vorz. Les résultats de ces évaluations sont exposés

CHAPITRE 11. ESTIMATION DES PLUIES SUR LE BASSIN VERSANT :

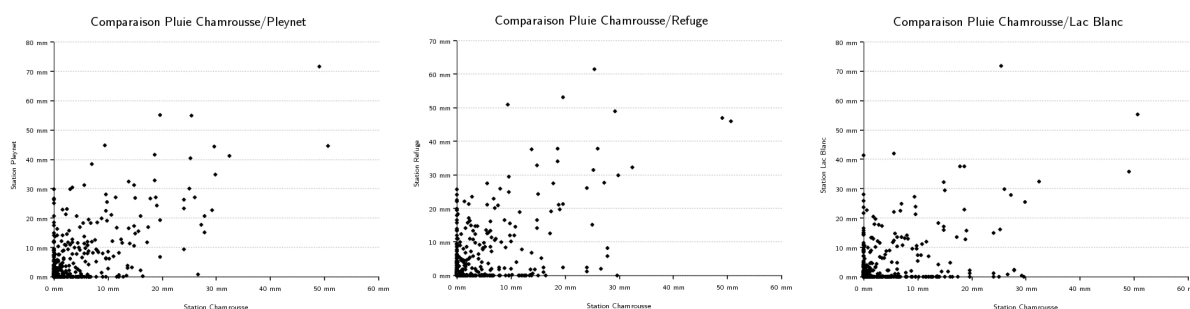


FIG. 11.4: Comparaisons des pluies journalières entre les stations du Vorz et la station de Chamrousse

dans le tableau 11.10.

	Station du Pleynet	Station du Refuge	Station du Lac Blanc
Estimation totale (en mm)	2781	2183	1730
Valeur totale (en mm)	2687	2292	1782
Erreur journalière (en %)	3,4 %	-5 %	-3 %
Différence journalière moyenne	0,5 mm	0,4 mm	0,3 mm

TAB. 11.10: Estimation de la pluviométrie journalière à partir des données de Chamrousse pour les stations du Vorz

Les valeurs du tableau sont présentées sous forme de cumul. En réalité, on a effectué, pour chaque journée où l'on disposait d'une valeur pluviométrique fiable sur le Vorz, l'estimation de la pluie à partir de la station de Chamrousse. On a alors comparé journalièrement la différence entre ces deux valeurs. Les résultats sont satisfaisants et permettent d'envisager l'utilisation de la méthode.

Le tableau montre tout d'abord des résultats sur les cumuls journaliers assez cohérents, avec des erreurs sur l'ensemble de la base de données de moins de 5%, ce qui est satisfaisant dans la gamme de résolution à laquelle on travaille, c'est-à-dire 3 stations météorologiques pour une surface de 20km^2 . Les erreurs commises pour chaque station, ont été quantifiées de manière précise, et, on obtient des résultats très corrects, puisque les erreurs sont inférieures au millimètre par jour en moyenne sur l'ensemble de la période. Ici, nous n'avons présenté que des résultats saisonniers, car, comme ces estimations seront utilisées ponctuellement durant l'hiver, lorsque nous manquons de données, l'idée essentielle est d'estimer correctement les cumuls sur une longue période, en l'occurrence, la période hivernale.

Les erreurs réalisées sur les cumuls journaliers ont été calculées précisément, donnant des valeurs tout à fait satisfaisantes pour une utilisation de la méthode. En effet, l'erreur journalière est inférieure à 2,5 mm dans plus de 80% des cas. Si l'on considère les erreurs inférieures à 5 mm, on monte à plus de 85% de réussite. Il s'avère donc que cette technique permet de générer des pluies journalières correctes à partir de la station de Chamrousse. En conséquence, il sera possible lorsque nous ne disposerons pas de l'information sur le Vorz en raison de la neige d'extrapoler les pluies à partir des données de la station voisine de Chamrousse.

Ainsi, nous avons vu que que les données des stations du Vorz présentaient des manques de mesures durant la période hivernale. Pour palier à ce problème,

11.2. UTILISATION DE DONNÉES ALTERNATIVES POUR RECALER LE RÉSEAU :

Station	Coefficient
Station du Pleynet	1,93 x Chamrousse
Station du Refuge	1,82 x Chamrousse
Station du Lac Blanc	1,73 x Chamrousse

TAB. 11.11: Coefficient de correction pluviométrique entre les stations du Vorz et Chamrousse

nous avons intégré la station de Chamrousse à notre base de données. Après avoir vérifié l'existence d'un comportement météorologique analogue à celles du Vorz, nous avons établi que nous pouvions utiliser cette station. Dans un second temps, l'extrapolation des données journalières à partir de Chamrousse et l'analyse des résultats a montré que la relation existant entre les sites était cohérente et pouvait être utilisée. De fait, par la suite, nous utiliserons ces données de Chamrousse dans le cas où celles du Vorz ne seront pas disponibles, et, nous générerons des cumuls journaliers à partir du coefficient de correction pluviométrique (cf tab.11.11) qui a été déterminé par les totalisateurs.

En réalité, pour parvenir à cette chronique complète des pluies, l'ensemble du réseau (totalisateurs et pluviomètres) a été utilisé et une station complémentaire sera importée dans la base. En d'autres termes, nous avons montré ici la polyvalence du réseau et l'efficacité du multi-échantillonnage spatial et temporel du point de vue de la connaissance de la pluviométrie.

Section 11.3

Méthodes d'estimation des précipitations locales :

Nous disposons de 3 stations de mesures sur le bassin versant, ainsi que d'une station annexe pouvant servir à l'extrapolation des températures. Nous souhaiterions aboutir à l'estimation des précipitations au pas de temps journalier pour la nivologie, et parfois horaire pour l'étude des crues. De plus, ces données devront être spatialisées sur l'ensemble du versant, en l'occurrence dans notre cas à 5 mètres de résolution, puisque l'on travaille sur la grille MNT de ce type, mais, la résolution spatiale peut tout à fait être moins précise (de l'ordre de 10 à 50 mètres). En conséquence, il va être nécessaire de spatialiser les pluies dont nous disposons sur l'ensemble du bassin versant, à la résolution de notre grille.

Pour cela, nous allons utiliser des méthodes différentes, adaptées au mieux à chaque situation, en fonction de la saison, du pas de temps de travail, ou encore de la complexité de l'interpolation des pluies que nous souhaitons mettre en oeuvre.

11.3.1 Variabilité temporelle de la méthode :

Selon la nature de l'étude que l'on va réaliser, on ne va pas systématiquement travailler au même pas de temps. Ainsi, en fonction de l'objectif poursuivi, on va choisir le pas de temps le plus adapté. On distinguera donc le choix du pas de temps de travail de la période à laquelle on souhaite travailler.

11.3.1.1 Choix du pas de temps de travail :

Au cours de la suite de ce travail, nous allons évoluer dans différentes problématiques pour lesquelles nous devons travailler à différents pas de temps.

- *Pas de temps saisonnier à journalier* : Précipitations liées à l'accumulation de la neige
- *Pas de temps journalier à horaire* : Précipitations printanières et estivales liées à des événements d'intensité moyenne ou en période de fonte
- *Pas de temps horaire à inférieur* : Etude des crues estivales (en majorité)

Malheureusement, on vient de voir que pour les pas de temps horaires et journaliers, les données disponibles sur le Vorz ne sont pas suffisantes, et qu'il est nécessaire de les extrapoler à partir d'une station annexe au bassin. Compte tenu des incertitudes liées à la méthode développée, il convient de l'utiliser avec parcimonie, afin de ne pas ajouter trop d'incertitudes à notre système de données d'entrées. En conséquence cette technique ne sera utilisée que lorsque cela est absolument nécessaire et indispensable.

11.3.1.2 Spécificité de la période de modélisation :

En fonction de la période à laquelle on va travailler, on est confronté sur le Vorz à des difficultés d'accès et d'exploitation des données. Ainsi, dès l'instant où le bassin versant sera soumis à des températures négatives, il deviendra difficile de faire confiance aux relevés de précipitations effectués par nos pluviomètres non-chauffants. A cette occasion, nous ferons appel à la technique d'extrapolation des données depuis la station de Chamrousse. Dans la réalité, sur l'ensemble de la campagne de mesure que nous venons de réaliser, nous sommes capables d'estimer à quelle hauteur nous aurons besoin d'avoir recours à cette technique

11.3. MÉTHODES D'ESTIMATION DES PRÉCIPITATIONS LOCALES :

comme en témoigne le tableau 11.12.

La limite de séparation de l'utilisation des données a été fixée à 0°, sachant que cette

Station	Utilisation possible ($T > 0^{\circ}C$)	Utilisation impossible ($T < 0^{\circ}C$)
Station du Pleynet	67 %	33 %
Station du Refuge	61 %	39 %
Station du Lac Blanc	54 %	46 %

TAB. 11.12: Taux d'utilisabilité des stations sur le versant du Vorz au pas de temps journalier et horaire

température ne constitue pas un absolu, puisqu'il peut neiger légèrement au dessus de celle-ci et pleuvoir légèrement en dessous. Malgré tout, en première approximation, cette limite sera tout à fait satisfaisante et permettre d'éliminer un grand nombre de données problématiques à exploiter. Le tableau met en évidence une décroissance du taux d'utilisabilité avec l'altitude qui était attendue, et qui correspond à l'évolution de la limite pluie/neige au cours de la saison. En conclusion, nous allons pouvoir utiliser ces données quasiment les deux tiers du temps pour nos modélisations, essentiellement au printemps et en été, lorsque les températures à la hauteur des stations seront positives. En ce qui concerne les précipitations horaires, les extrapolations depuis la station de Chamrousse seront évitées autant que faire ce peut, dans la mesure où ces données seront utilisées pour simuler des épisodes pluvieux intenses et donc bien souvent limités localement. Dans cette situation, la station de Chamrousse ne sera dans la plupart des cas pas représentative des événements se produisant sur le Vorz.

Le tableau 11.13 résume les différentes situations qui vont se présenter à nous en terme d'utilisations des données pluviométriques.

Période	Pas de temps SAISONNIER & MENSUEL	Pas de temps JOURNALIER	Pas de temps HORAIRE
Hiver $T < 0^{\circ}C$	Données Vorz (totalisateur et éventuellement pluviomètre)	Extrapolation Chamrousse	***
Ete $T > 0^{\circ}C$	Données Vorz	Données Vorz	Données Vorz

TAB. 11.13: Utilisation des différentes sources de données en fonction des variables temporelles de pas de temps et de période d'étude

11.3.2 Techniques d'estimations spatiales :

Après avoir vu comment la variabilité temporelle des situations de travail va faire évoluer les techniques d'utilisations et d'extrapolations des données, nous allons maintenant voir comment la variabilité spatiale va impliquer l'utilisation de techniques d'interpolations différentes. Ainsi, nous avons vu que la pluviométrie sur le Vorz, est majoritairement gouvernée par la position dans le bassin et la typologie des perturbations, plus que la variation de l'altitude. De plus, nous ne disposons que de 3 stations sur le bassin versant pour lesquelles nous n'avons pas réussi à mettre en évidence un gradient ou une relation régulière sur l'ensemble de la période de mesure. En conséquence, nous avons développé des techniques d'interpolations légères, afin

CHAPITRE 11. ESTIMATION DES PLUIES SUR LE BASSIN VERSANT :

d'introduire le moins de biais et d'incertitudes possibles dans les données, qui constitueront nos données d'entrées de modélisation.

Le paragraphe précédent a permis de mettre en évidence les données utilisables pour l'extrapolation des températures. Dans la réalité, nous ne souhaitons utiliser que les valeurs de précipitations enregistrées ou estimées à la hauteur de nos 3 stations de référence. Ensuite, l'ensemble des interpolations de précipitations qui seront réalisées le seront à partir de la position géographique de ces stations, et en utilisant uniquement leurs données respectives. Nous aurons donc en permanence des données horaires (chroniques continues avec ponctuellement des estimations issues des données de Chamrousse) pour chacun des sites équipés sur le bassin et ce, quelle que soit la période.

11.3.2.1 Méthode des polygones de Thiessen :

Nos différentes approches ont montré qu'il est difficile, de mettre en évidence une relation claire ou un gradient orographique précis systématique entre nos différentes stations. Cependant, à l'échelle d'un événement ou d'une journée, il se dégage une cohérence entre les enregistrements des différentes stations. Ainsi, la première technique que nous avons mis en place consiste simplement à utiliser pour chaque point du bassin versant les données correspondant à la station la plus proche. Dans cette situation, aucune correction de la donnée ne sera effectuée, nous n'introduirons donc pas d'erreur supplémentaire en ajoutant l'utilisation d'un gradient ou d'une correction mal estimée et apportant finalement plus d'incertitudes que de résolution. Nous aurons donc des estimations de températures assez peu spatialisées mais entachées d'un minimum d'erreur et issues de méthodes légères et simples à implémenter.

Afin de prendre en compte les phénomènes que nous avons mis en évidence d'après l'étude des saisons passées, l'originalité de la technique va se manifester par la prise en compte à part égale de l'altitude et de la position sur l'ensemble du bassin. Nous ne calculerons donc pas une simple distance entre la station et le point à estimer, puisque nous prendrons en compte l'altitude en calculant une "distance 3D".

a) Calcul de la distance 3D :

En règle générale, on calcule la distance entre deux points sur un bassin versant à partir de leurs coordonnées projetées sur la carte en 2 dimensions (cf eq.11.1).

$$Distance_{2D} = \sqrt{(X_{Sta} - X_{Pt})^2 + (Y_{Sta} - Y_{Pt})^2} \quad (11.1)$$

Or, on a vu que au delà de la position d'un point sur le bassin, il existait tout de même ponctuellement et périodiquement une relation entre l'altitude et la variation des précipitations (gradient orographique négatif en hiver par exemple). Il est donc important de prendre en compte l'altitude dans la détermination de la distance à la station. De fait, nous allons intégrer au calcul de la distance une troisième dimension en considérant la valeur d'altitude entre les deux points. On aura donc une relation de base :

$$Distance_{3D} = \sqrt{(X_{Sta} - X_{Pt})^2 + (Y_{Sta} - Y_{Pt})^2 + (Alti_{Sta} - Z_{Pt})^2} \quad (11.2)$$

Dans la relation précédente, l'altitude et la position sont donc prise en compte, mais, le bassin versant étant plus étendu horizontalement (environ 7 kilomètres) que verticalement (environ 2200 mètres), on donne implicitement plus d'importance à la position qu'à l'altitude. Ici, nous souhaiterions que l'altitude et la position jouent le même rôle dans l'estimation

11.3. MÉTHODES D'ESTIMATION DES PRÉCIPITATIONS LOCALES :

de la précipitation, afin de ne pas avantager un phénomène plus que l'autre, et rester dans un comportement moyen sur le bassin versant sans introduire de biais ne reposant sur aucun systématisme avéré. Ainsi, nous allons introduire un coefficient correctif visant à donner autant d'importance au deux paramètres :

$$Coefficient\ correction_{Alti/Pos} = \frac{Max(L_{BV}, l_{BV})}{\Delta Z} \quad (11.3)$$

Avec : **L** l'étendue nord/sud du bassin versant et **l** l'étendu est/ouest

Au final on obtient la relation suivante (équation 11.4) que l'on utilisera dès lors qu'on parlera de distance à une station pour la pluviométrie :

$$Distance_{3D} = \sqrt{(X_{Sta} - X_{Pt})^2 + (Y_{Sta} - Y_{Pt})^2 + Coef_{Alti/Pos} \times (Alti_{Sta} - Z_{Pt})^2} \quad (11.4)$$

L'ensemble des résultats obtenus en appliquant les différentes formules de distances sont présentés dans la figure 11.5.

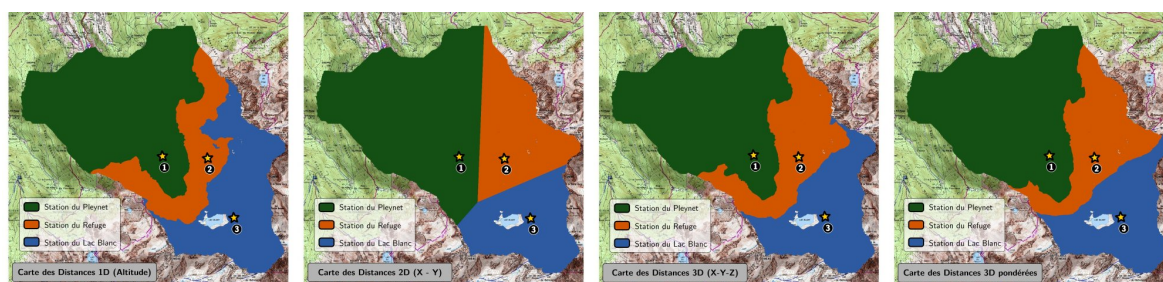


FIG. 11.5: Carte des zonages de chaque station en fonction des différentes méthodes d'estimations des distances utilisées

b) Interpolation des précipitations :

La phase la plus longue dans cette méthode est de déterminer la distance 3D de chaque point du versant à chaque station. Ensuite, lorsque cette distance est calculée, la suite des opérations est beaucoup plus simple, puisqu'il suffit de rechercher dans la base de données de la station la plus proche la température mesurée ou estimée, suivant la situation à la date et au pas de temps souhaité. On a donc :

$$Precipitation_{X,Y} = Pluie[D_{min}(Station - Point)] \quad (11.5)$$

11.3.2.2 Méthode d'estimation spatiale et altitudinale :

La seconde méthode élaborée permettant d'interpoler les températures aux différents points du bassin versant reste, bien que plus complexe, très simple à mettre en oeuvre, et ne fait pas appel à des paramètres extérieurs. Cette fois ci, nous allons utiliser la distance 3D, et estimer en chaque point l'impact des 3 stations de mesure en fonction de leur distance en y ajoutant une dimension altitudinale. Ainsi, dans un premier temps, on cherchera pour un point donné, la station la plus proche de laquelle il se trouve. Dans un second temps, l'espace du bassin versant sera découpé en zones altitudinales (l'altitude étant essentiellement liée à la position dans le bassin versant), comme cela est présenté dans la figure 11.6. Les valeurs pluviométriques des stations seront alors utilisées pour créer une correction altitudinale locale, au pas de temps

CHAPITRE 11. ESTIMATION DES PLUIES SUR LE BASSIN VERSANT :

étudié. Enfin, la précipitation au droit du point analysé sera évaluée en fonction de la station la plus proche et corrigée à partir du coefficient local précédent. L'ensemble des équations régissant ce calcul est présenté dans la figure 11.6.

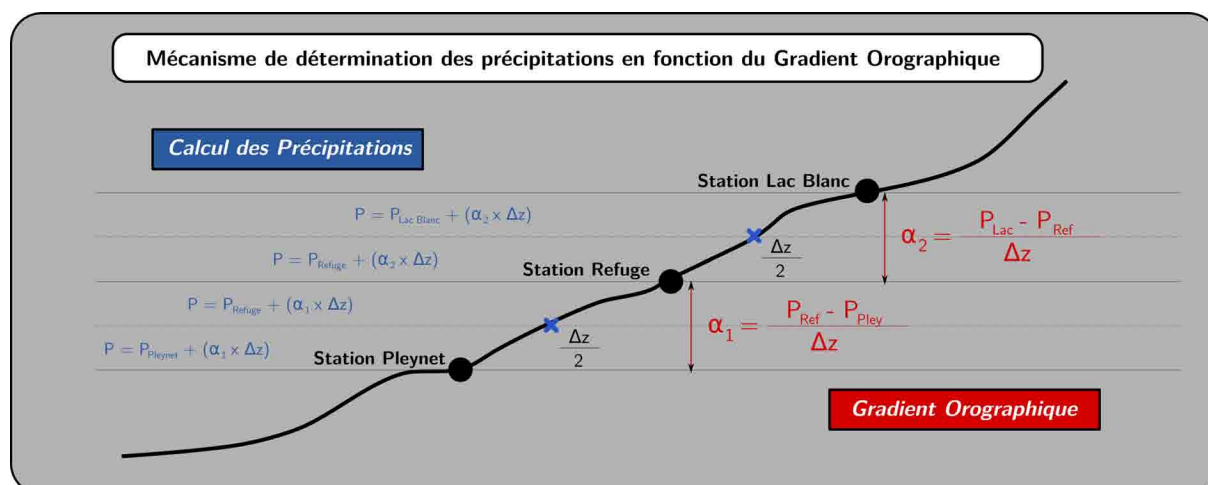


FIG. 11.6: Relations du calcul des précipitations sur le versant en fonction de la position et de l'altitude

Le mécanisme d'estimation élaboré présente divers avantages. Il est possible grâce à celui-ci de pouvoir tenir compte à la fois du paramètre morphologique et spatial de la répartition des pluies, et, des variations altitudinales qui jouent un rôle ponctuel sur le bassin versant. De plus, grâce au gradient orographique, il est possible de simuler des pluies plus faibles ou plus fortes que les relevés effectués. Ainsi, on va pouvoir mieux représenter les tendances à la diminution ou à la hausse en fonction de l'altitude sur le versant, ce qui serait impossible avec une simple pondération du rôle de chaque station en fonction de sa distance, comme nous l'avions envisagé au départ. Enfin, ces cartes présentent l'avantage de pouvoir être réalisées aux différents pas de temps de mesures dont nous disposons, de manière à les utiliser pour différents objectifs.

11.4. GÉNÉRATION DES PRÉCIPITATIONS SPATIALES SUR LE VORZ :

Section 11.4

Génération des précipitations spatiales sur le Vorz :

Maintenant que nous avons vu de quelle manière nous réalisons les interpolations des pluies sur le bassin versant, nous allons observer les résultats obtenus pour les deux méthodes sur quelques évènements remarquables enregistrées sur le Vorz. Pour cela, nous avons choisi 3 évènements différents en terme de période, d'intensité et de localisation des précipitations maximum.

Dans ces trois exemples, nous simulerons tout d'abord la carte des pluies en fonction de la station la plus proche corrigée de l'altitude. La deuxième simulation sera réalisée en prenant en compte l'éloignement des stations et la valeur du gradient orographique local.

11.4.1 Episode neigeux "hivernal" du 15 Mai 2010 :

Dans ce premier exemple, nous sommes dans une situation d'un épisode neigeux hivernal intense, en dépit de la période. Ainsi, les températures sont largement inférieures à la température critique (limite pluie/neige) sur une grande partie du bassin versant, donc, nous allons utiliser la station de Chamrousse pour simuler les pluies réelles. Il est à noter que les images prises sur le versant par le système SnoDECC montrent au moment de cet épisode des cumuls neigeux très conséquents qui devront se retrouver notamment dans la partie haute du versant.

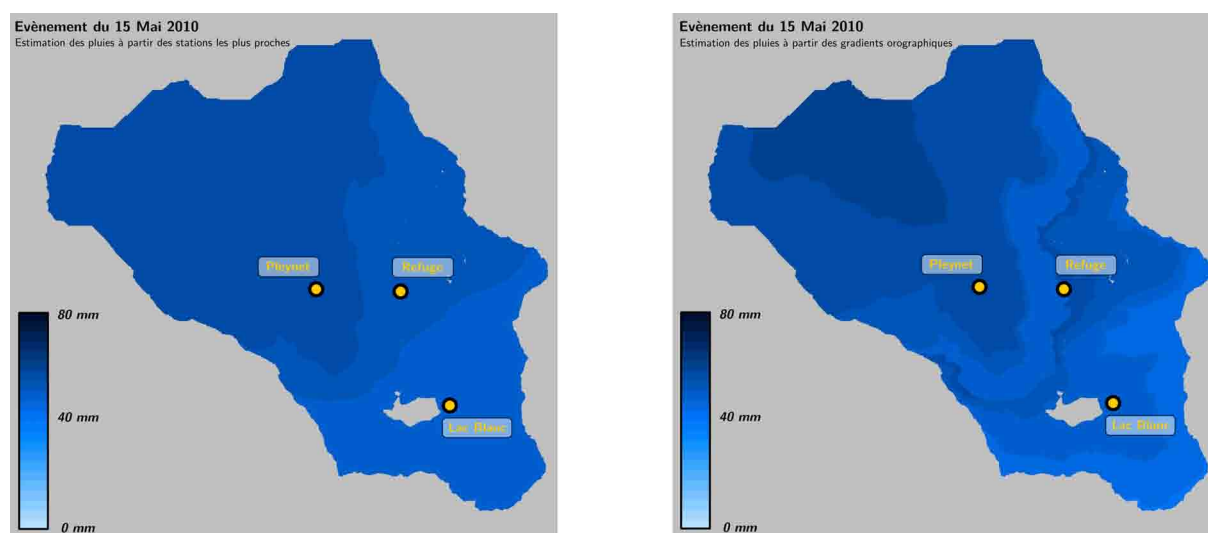


FIG. 11.7: Evènement du 15 Mai 2010

Les deux cartes présentées dans la figure 11.7 montrent une tendance claire à la décroissance des précipitations avec l'altitude, et ce, même en cas d'utilisation d'une correction pluviométrique. Cela est dû au fait que nous utilisons la station de Chamrousse pour simuler les précipitations et donc un gradient saisonnier. Malgré tout, il est enregistré des cumuls très importants dans les stations basses, et les accumulations sur le haut du versant restent très conséquentes dans les deux cas, avec des totaux journaliers supérieurs à 40mm. Ainsi, cet évènement est typique de ceux que l'on peut trouver à la fin du printemps avec de forts cumuls

CHAPITRE 11. ESTIMATION DES PLUIES SUR LE BASSIN VERSANT :

pluviométriques à faible altitude, et des chutes de neige abondantes dans la partie haute. Nous avons ici un exemple typique de la complexité de la modélisation dans les zones de montagne, puisque pour cet événement les précipitations seront sous forme de neige au refuge et au lac, et, sous forme de pluie à la hauteur du Pleynet. La répartition entre ces différentes formes de précipitations se fera à l'étape suivante, lorsque l'on voudra calculer l'évolution des stocks de neige au pas de temps souhaité à l'aide des températures. On notera ici que bien que l'on utilise les extrapolations issues de la station de Chamrousse, les précipitations calculées correspondent bien aux pluies mesurées par les pluviomètres en zone non neigeuse, validant le principe et l'efficacité de la méthode utilisée.

11.4.2 Episode estival "orageux" du 5 Aout 2010 :

Le 5 Août 2010, un épisode orageux estival typique se produit sur le Vorz. Ainsi, l'ensemble des températures sont positives, et, on peut utiliser les données mesurées sur le versant sans réaliser d'extrapolation à partir de la station de Chamrousse. Dans ce cadre, les précipitations mesurées montrent un gradient croissant vers le haut bassin et la station du Lac (cf fig.11.8). Dans les deux types de modélisations, on obtient donc des cumuls croissants avec l'altitude. Dans le cas de l'utilisation des corrections pluviométriques, les précipitations s'intensifient encore dans la partie sommitale, pour atteindre des cumuls supérieurs à 100 mm, contre un enregistrement de 71 mm au lac Blanc. Ici, l'utilisation du gradient orographique permet de rendre compte de la réalité de l'intensification des précipitations avec l'altitude qui est mesurée réellement entre nos stations.

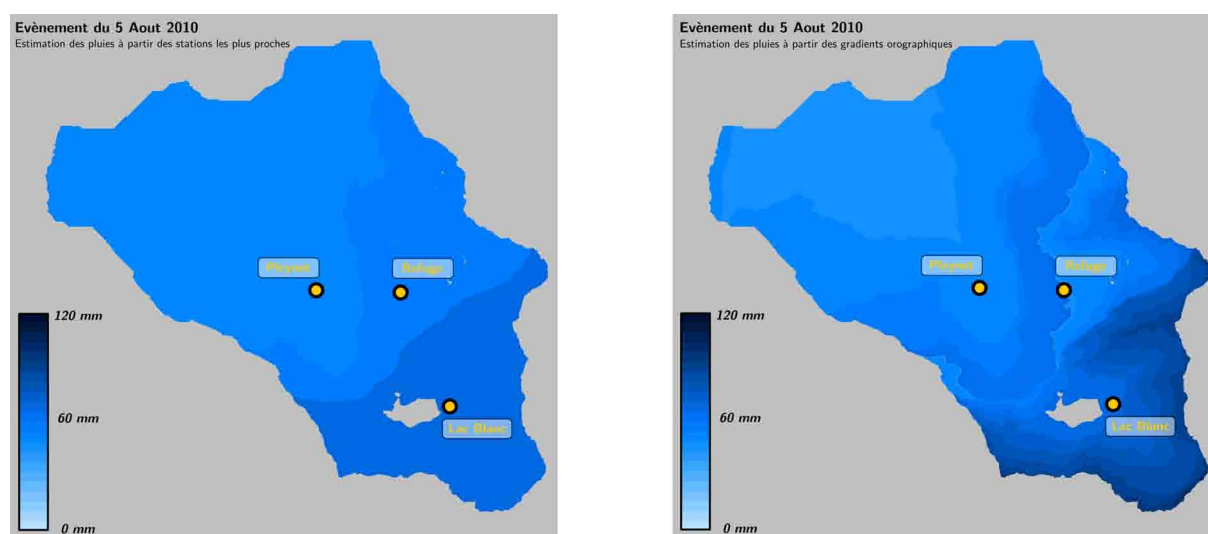


FIG. 11.8: Evènement du 5 Aout 2010

11.4.3 Episode printannier "pluvieux intense" du 31 mai 2011 :

Dans cet épisode de fin de printemps, on est dans une situation où le manteau neigeux est encore présent, mais où les températures sont toutes positives lors des pluies. Ainsi, on observe malgré tout un gradient décroissant en altitude, confirmé par les enregistrements de la station de Chamrousse. Les cartes 11.9 montrent donc des précipitations abondantes dans les parties basses, correspondant parfaitement aux enregistrements effectués au niveau de nos stations. Ici, les cumuls mesurés dans la partie basse sont proches de 70 mm et lors de l'utilisation

11.4. GÉNÉRATION DES PRÉCIPITATIONS SPATIALES SUR LE VORZ :

des corrections pluviométriques, il peuvent s'élever à près de 100 mm. Ce type de simulation nous permet de spatialiser les précipitations sur le versant, ce qui rendra son comportement plus réaliste que la simple utilisation de la valeur des stations les plus proches. Malgré tout, il conviendra de contrôler régulièrement la pertinence des valeurs calculées à partir du gradient orographique, car du fait de la position de stations sur le versant, celui-ci peut être entâché de quelques erreurs, notamment en cas de disparité de la forme des précipitations sur certaines stations.

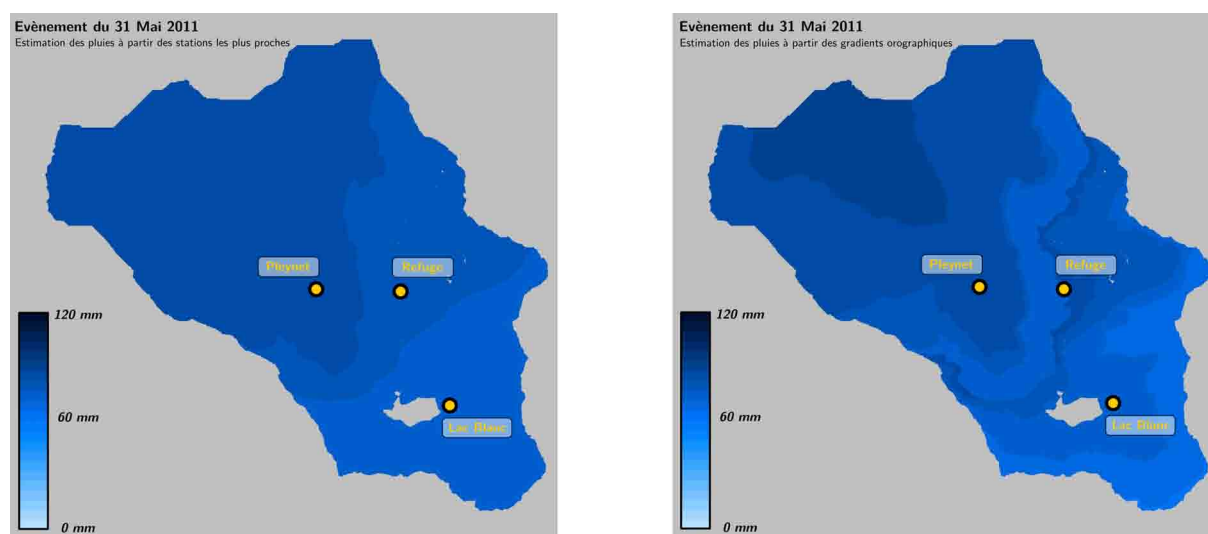


FIG. 11.9: Evènement du 31 Mai 2011

En conclusion, nous avons montré comment il était possible d'obtenir des chroniques pluviométriques continues en dépit de l'inopérabilité ponctuel de nos stations, à partir de l'extrapolation des données d'une station de référence comme celle de Chamrousse. De plus, nous avons défini deux méthodes permettant de générer des pluies sur le bassin reflétant au mieux le comportement local des précipitations. Ces méthodes montrent des résultats satisfaisants, et ce, même en période hivernale. L'ensemble de ces cartes pluviométriques sera utilisé en parallèle des cartes de températures, afin de déterminer la typologie des précipitations en différents points du bassin versant. Nous allons maintenant voir comment ces températures peuvent être simulées.

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 11 :

Au cours de ce chapitre, nous avons montré que l'utilisation croisée, de données des différents instruments pluviométriques du Vorz et de stations annexes, permettait de rendre compte efficacement de la pluviométrie à la surface du bassin versant. Dans un premier temps, on a vu que la spécificité du milieu d'étude implique une dualité du comportement des précipitations sur le bassin. Cette dualité entraîne un fonctionnement discontinu des pluviomètres (non-chauffants) qui peut être compensé par la présence de totalisateur permettant de recalculer les précipitations hivernales. A l'échelle de temps saisonnière, le bassin versant est donc parfaitement instrumenté et on dégage les tendances suivantes :

- Gradient orographique négatif en hiver*
- Pas de gradient orographique significatif en été*

Au pas de temps journalier, il semble plus difficile de mettre en avant des comportements généraux similaires, et la pluviométrie semble plus variable. Devant l'impossibilité d'établir des gradients orographiques précis sur le bassin, nous avons opté pour le renforcement du réseau par l'intermédiaire d'une station de montagne proche. Après avoir vérifié la cohérence des données vis-à-vis de celles du Vorz, nous avons établi une relation permettant d'estimer une précipitation sur le Vorz à partir de la station de Chamrousse. Cette estimation repose sur un coefficient de correction issu de la comparaison des tendances annuelles. Il est ainsi possible d'obtenir une chronique complète pour les stations météorologiques du Vorz. On notera que le recours à cette technique bien que précise (85% d'estimation à moins de 5 mm/j d'erreur) est utilisé avec parcimonie, puisqu'elle n'est utilisée que lorsque les températures sont inférieures à 0°C à la hauteur d'une station.

A partir de ces résultats, nous avons implémenté deux méthodes d'interpolation des pluies sur la surface du bassin versant :

- Méthode des polygones de Thiessen : Station la plus proche*
- Méthode des polygones de Thiessen modifiée : Dans cette méthode, on a ajouté un coefficient correctif de manière à prendre en compte de manière égale l'altitude et la position dans le bassin versant*
- Méthode des corrections pluviométriques : Cette méthode prend en compte à la fois la distance à la station et les différences altitudinales (calcul de gradient)*

L'ensemble de ces conclusions et méthodes permettent d'obtenir des cartographies au pas de temps souhaité pour les futurs travaux. Dans le cadre des estimations nivologiques, la pluviométrie joue un rôle essentiel, puisqu'elle est la donnée d'entrée pour la constitution du manteau neigeux. Cependant, la pluviométrie seule ne permet pas de connaître l'évolution de ce manteau, puisqu'une dimension thermique entre également en jeu. Nous allons maintenant voir comment les cartes pluviomé-

11.4. GÉNÉRATION DES PRÉCIPITATIONS SPATIALES SUR LE VORZ :

triques peuvent être utilisées pour alimenter le manteau neigeux, en fonction de l'évolution des champs de température à la surface du bassin versant, dont nous allons présenter les méthodes d'estimations.

Chapitre 12:

Interpolation des Températures à partir du réseau :

Sommaire du Chapitre:

12.1 Techniques d'analyses des données iButton et recalage par rapport aux stations de référence :	289
12.1.1 Caractéristiques générales des iButtons :	289
12.1.2 Calcul des gradients thermiques liés à l'altitude :	289
12.1.3 Calcul des gradients d'exposition :	292
12.1.4 Recalage par rapport aux stations :	292
12.2 Méthodes de calcul et d'interpolation des températures :	294
12.2.1 Interpolation des températures à partir des gradients thermiques :	294
12.2.2 Interpolation des températures du versant par génération des gradients locaux :	295
12.3 Génération des cartes de températures au pas de temps horaire :	298
12.3.1 Générations des cartes de températures journalières :	298
12.3.2 Modélisation de phénomènes météorologiques spécifiques : l'Inversion Thermique :	303
12.3.3 Modélisation de l'impact de l'exposition sur les températures en fonction des saisons :	304

Introduction du Chapitre 12 :

Les précipitations sont l'élément moteur l'hydrométéorologie d'un bassin versant. Le second élément déterminant est la température. En effet, elle conditionne la typologie des précipitations tout au long de l'année, et donc, l'évolution des stocks de neige sur le bassin versant. Connaître la température est une opération délicate, puisqu'elle varie fortement en fonction de l'altitude, de l'exposition, ou encore de la course du soleil et de l'évolution des zones d'ombres. Pour mieux appréhender le champ des températures, nous avons mis en place des stations météorologiques (cf. Chapitres 3 & 4), ainsi qu'un ensemble de mini-capteurs de températures sur l'ensemble du bassin versant.

De ces enregistrements, nous espérons tirer un maximum d'informations, en particulier sur les différences de températures entre les stations placées chacune dans des conditions différentes impliquées par des altitudes, expositions et positions variables. Les données seront analysées à pas de temps fin, de manière à prendre en compte les disparités journalières, l'objectif final étant d'obtenir des cartographies du champ de température à la surface du bassin versant au pas de temps horaire. Par la suite, ces cartes pourront être utilisées en association avec les cartes pluviométriques pour reproduire l'évolution de la couverture neigeuse à la surface du bassin. Cette opération se fera dans un premier temps au cours de la saison, puis à l'échelle journalière, permettant ainsi de mieux étudier les oscillations nocturne/diurne des phénomènes de fonte.

Pour cela, nous allons dans un premier temps analyser les données issues des mini-capteurs (iButton) de température, et les comparer aux stations météorologiques classiques, au droit desquelles nous disposons d'un capteur de recalibration du système. Les analyses des différences nous permettront alors de déterminer la gamme d'erreur générale de travail, obtenu par le réseau de iButtons.

Dans un second temps, nous allons présenter les deux techniques que nous avons implémenté afin de déterminer les champs de températures sur le bassin versant. On verra à cette occasion que ce sont des techniques légères et robustes, permettant d'être intégrée à un modèle hydrologique adapté aux zones de montagnes.

Pour finir, quelques résultats particuliers seront présentés, mettant en avant la robustesse de la méthode, et sa flexibilité dans la reproduction de la variabilité des températures sur l'ensemble de la zone d'étude. Ces différents résultats seront sélectionnés à différents pas de temps (horaire, journalier, saisonnier), de manière à représenter au mieux les différentes conditions que l'on peut observer sur le bassin versant.

Section 12.1

Techniques d'analyses des données iButton et recalage par rapport aux stations de référence :

Dans les *chapitres 3 et 4* de la première partie, nous avons vu comment était constitué le réseau de mesure des températures sur le Vorz, à partir des stations météorologiques et des iButtons. L'ensemble de ces données doit tout d'abord être analysé afin de mettre en évidence des modalités de comportement générales, ainsi que certaines spécificités liées à l'altitude, l'exposition ou encore la position dans le bassin versant. À l'image de ce qui a déjà été réalisé dans le chapitre 4, nous avons analysé plus spécifiquement les domaines liés aux iButtons.

12.1.1 Caractéristiques générales des iButtons :

Tout au long du travail suivant, on va essentiellement s'appuyer sur les données de températures enregistrées par les iButtons, du fait de l'échantillonnage conséquent qu'elles offrent. Dans un second temps seulement, on s'intéressera aux stations météorologiques proprement dites, pour des raisons qui seront explicitées dans les paragraphes suivants. Ainsi, le réseau de iButtons s'échelonne de 900 à 2450 mètres d'altitude, avec une altitude moyenne de 1760 mètres. Sur ce réseau, la température moyenne enregistrées est de $3,5^{\circ}\text{C}$ sur l'ensemble des deux saisons de fonctionnement.

On a coutume d'utiliser en montagne un gradient thermique moyen pour caractériser la baisse des températures avec l'altitude. Dans notre cas, ce gradient thermique moyen pour l'ensemble des iButtons donne des valeurs relativement faibles, comparées aux valeurs classiquement utilisées (environ $0,6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), puisque l'on calcule ici un gradient de $0,4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Cette différence peut s'expliquer en partie par la morphologie du versant. En effet, de part le fort encaissement qu'on y observe, la plupart des zones sont assez peu exposées au soleil et sont souvent à l'ombre, ce qui rend l'évolution des températures plus limitée. De plus, durant la période hivernale, une grande partie du bassin versant est quasi continuellement à l'ombre ce qui tend à homogénéiser le champ de température à sa surface.

Globalement, on peut donc dire que le bassin versant du Vorz est relativement froid, avec des zones importantes situées à l'ombre des versants, qui lui confèrent un caractère particulièrement austère, notamment en hiver. Cette particularité morphologique entraîne la présence d'un gradient thermique relativement faible pour un bassin versant de montagne. Cependant, l'ensemble de ces caractéristiques sont moyennées sur l'ensemble du versant et il convient maintenant de les analyser selon différents paramètres.

12.1.2 Calcul des gradients thermiques liés à l'altitude

Lorsque l'on étudie les variations des températures en montagne, le paramètre le plus évident intervenant dans leur hétérogénéité est l'altitude. Ainsi, nous allons dans un premier temps voir de quelle manière évoluent ces gradients entre les différentes stations, à différents pas de temps. Pour le moment, nous intégrerons dans nos calculs l'ensemble des stations du réseau en ne prenant que leur altitude comme élément discriminant.

12.1. TECHNIQUES D'ANALYSES DES DONNÉES IBUTTON ET RECALAGE PAR RAPPORT AUX STATIONS DE RÉFÉRENCE :

12.1.2.1 Gradient thermique "saisonnier" :

Nous avons défini précédemment le gradient thermique général du bassin versant, mais, au cours de la saison, celui-ci est susceptible de varier en fonction de la période, mais également en fonction de l'altitude. Ainsi, si les stations voient leurs températures évoluer au cours de l'année, la relation les unissant est également susceptible de changer en fonction de la période et nous pouvons avoir à faire face à des gradients différents en fonction du mois par exemple. Pour chaque mois, nous avons donc calculé un gradient thermique sur l'ensemble des stations du versant. Les résultats sont présentés dans le tableau 12.1 et la figure 12.1.

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Gradient	-0,19	-0,31	-0,38	-0,52	-0,56	-0,52
Moyenne	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
-0,36	-0,39	-0,33	-0,26	-0,18	-0,37	-0,34

TAB. 12.1: Evolution des gradients thermiques mensuels moyens calculés à partir des iButtons

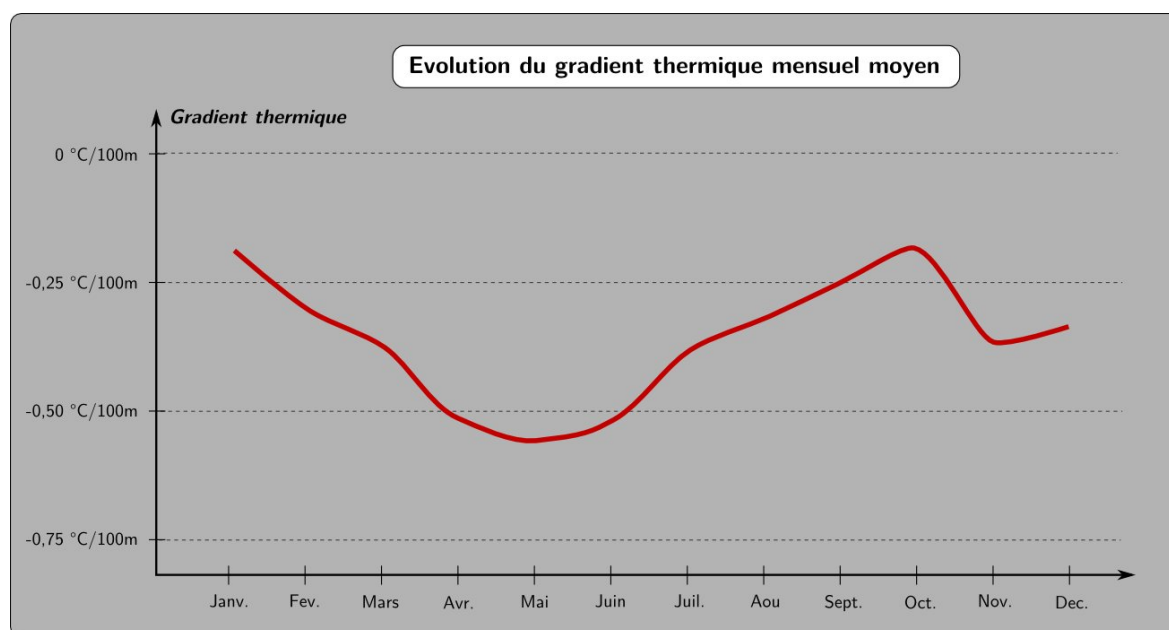


FIG. 12.1: Evolution des gradients thermiques mensuels généraux

Le tableau et le graphique mettent en évidence une variation du gradient au cours de l'année. Ainsi, il semble que ce gradient thermique est plus important en été et au printemps qu'en hiver. En effet, durant la période hivernale qui s'étend de fin octobre à avril suivant les années, on observe un gradient thermique proche de $0,3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. En revanche pendant la saison estivale, le gradient est plus fort et atteint plus de $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Ces différences sont en grande partie expliquées par le fait que le versant possède une morphologie particulière. Ainsi, durant l'hiver, la majeure partie du versant est à l'ombre puisque majoritairement orientée vers le nord. Cependant, en été de larges parties du versant sont plus exposées au soleil, ce qui entraîne au cours de la journée des hétérogénéités de températures plus importantes. Une nouvelle fois, on met en évidence l'importance des caractéristiques physiques du versant vis à vis des paramètres météorologiques.

CHAPITRE 12. INTERPOLATION DES TEMPÉRATURES À PARTIR DU RÉSEAU :

12.1.2.2 Evolution des gradients thermiques "journaliers" :

Nous venons de voir de quelle nature étaient les variations mensuelles des températures et gradient sur le Vorz, mais, les températures ne varient pas uniquement entre les saisons, elles varient également à l'échelle journalière, durant le cycle diurne/nocture. En conséquence, il convient d'analyser également de quelle manière se répartissent les hétérogénéités au cours d'une journée. Pour cela, on a analysé les températures journalières heure par heure, afin de mettre en évidence de grandes tendances quant à leur évolution. Les résultats sont présentés dans le tableau 12.2 et la figure 12.2.

1h	2h	3h	4h	5h	6h
-0,37	-0,36	-0,35	-0,34	-0,34	-0,33
7h	8h	9h	10h	11h	12h
-0,33	-0,32	-0,32	-0,32	-0,31	-0,32
13h	14h	15h	16h	17h	18h
-0,32	-0,33	-0,35	-0,38	-0,4	-0,42
19h	20h	21h	22h	23h	24h
-0,43	-0,43	-0,42	-0,4	-0,39	-0,38

TAB. 12.2: Evolution des gradients thermiques horaires moyen calculés à partir des iButtons

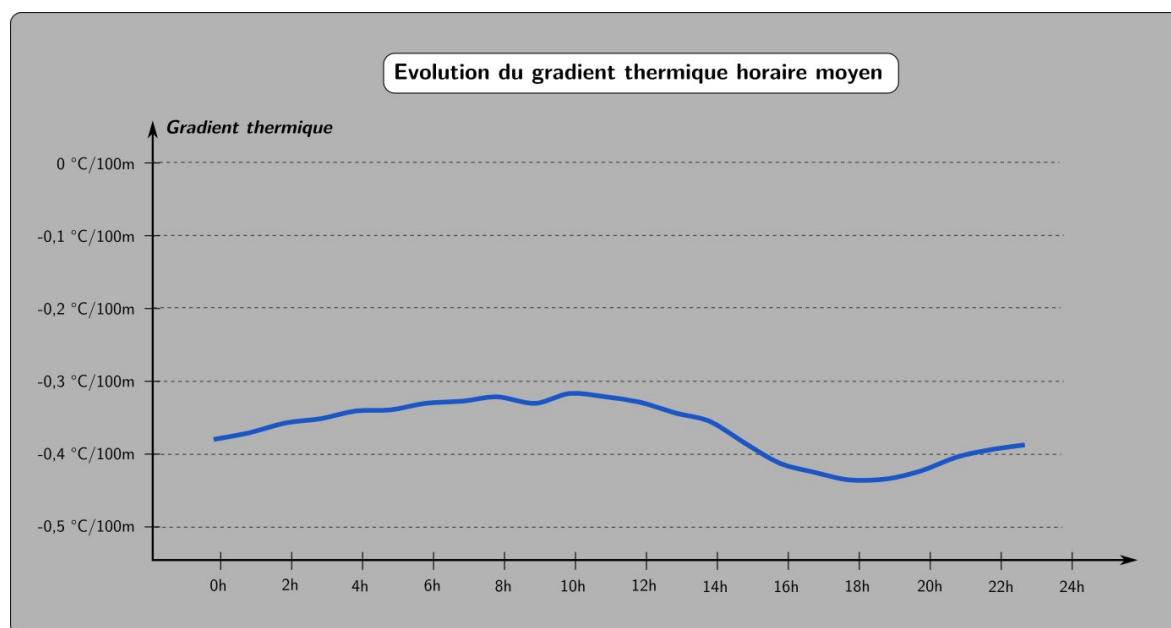


FIG. 12.2: Evolution des gradients thermiques horaires généraux

A l'image de ce que l'on a mis en évidence pour les saisons, les gradients thermiques varient également au cours de la journée. Il existe ainsi une période pendant laquelle ces gradients sont les plus élevés, entre 15h et 20h, qui correspond au moment où le soleil disparaît sur le bassin versant. En réalité, les gradients les plus faibles sont observés durant les heures les plus chaudes, puisqu'à cet instant, la plus grande partie du versant est ensoleillée. En revanche, lorsque la position du soleil commence à évoluer, certaines zones se refroidissent rapidement, tandis que

12.1. TECHNIQUES D'ANALYSES DES DONNÉES IBUTTON ET RECALAGE PAR RAPPORT AUX STATIONS DE RÉFÉRENCE :

d'autres bénéficient encore de l'ensoleillement. Durant la nuit, la température redevient plus homogène puisque l'ensemble du versant est soumis à des conditions similaires.

12.1.3 Calcul des gradients d'exposition :

Au cours des *chapitres 3 et 4* on a présenté la répartition des iButtons sur le versant, et notamment, nous avons vu que plusieurs transects ont été réalisés de manière à essayer de mettre en évidence des influences locales, ainsi que des comportements différents selon l'exposition des iButtons. L'ensemble de ces transects ont été analysé, mais, ils n'ont pas permis de mettre en évidence un rôle clair de l'exposition dans la variation des températures, et cela pour plusieurs raisons majeures.

Tout d'abord, il s'avère que malgré la grande diversité de positions et d'altitudes des différents capteurs, il est très difficile d'étudier pour une altitude donnée la variation des températures en fonction de l'exposition, puisque nous ne disposons pas le plus souvent d'un échantillon d'exposition différents (au plus 3 expositions différentes pour une même altitude). De plus, la morphologie du bassin versant présente l'inconvénient de posséder une discontinuité majeure orientée NO/SE et qui entraîne une grande dualité de comportement. Ainsi, notre objectif de départ qui était de définir des gradients thermiques entre expositions s'est avéré très difficile à atteindre, en grande partie à cause du manque de diversité des expositions échantillonnées ; mais également, en raison du manque de continuité entre les expositions différentes, situées la plupart du temps à des altitudes très variées, et donc difficilement comparables.

Pour ajouter à cette complexité, il faut également préciser que le comportement local des stations a un impact non négligeable selon les sites. Ainsi, certaines stations orientées dans une direction donnée sont localisées de telle sorte que la morphologie du bassin versant a plus d'impact que l'exposition. En témoigne par exemple le iButton de la station du Lac Blanc, qui malgré son exposition ouest est très encaissé et possède plutôt un comportement de type nord, puisqu'il ne voit pas le soleil de l'hiver. De même d'autres iButtons orientés à l'ouest (celui du refuge par exemple) présentent plutôt un comportement de type sud en raison de leur position dégagée en altitude et donc rapidement exposée au soleil. En réalité, ce constat vient mettre en évidence que l'exposition n'est pas le facteur principal des variations des températures. En réalité, ce facteur principal est la présence ou non d'éclairement par le soleil à une heure donnée. Ainsi, il aurait été nécessaire de réaliser la cartographie des zones d'ombres en temps réel sur le bassin versant, afin de s'affranchir de ce problème, et de définir des gradients non plus en fonction de l'exposition, mais en fonction de la situation d'éclairement d'une station donnée.

Ce que vient de mettre en avant ce paragraphe est une nouvelle fois la prépondérance de la morphologie du versant dans l'évolution des températures. Dans ce cadre, c'est ce paramètre qui détermine l'éclairement sur le versant et donc la disparité des températures (contraste ombre/soleil). De fait, même si nous ne pourrions pas tenir compte de l'exposition dans nos interpolations, par des gradients précis, celle-ci sera en permanence prise en compte lorsque nous utiliserons les différentes stations qui présenteront des comportements différents en fonction de la course du soleil. Ainsi, l'exposition sera prise en compte de manière indirecte dans l'ensemble de nos futures modélisations.

12.1.4 Recalage par rapport aux stations :

Durant toute la première partie du mémoire, nous avons souligné l'efficacité du multi-échantillonnage en terme de température, mais également la différence de précisions entre capteurs classiques et capteurs de type iButtons. Lors de l'interpolation des températures, il

CHAPITRE 12. INTERPOLATION DES TEMPÉRATURES À PARTIR DU RÉSEAU :

conviendra de corriger ces différences. Ici, l'objectif est de rendre compte au mieux de l'hétérogénéité des températures sur le versant, et, dans ce cadre des iButtons soit très exposés au soleil, soit très ombragés nous intéressent fortement. Malheureusement, nous ne sommes dans ces situations pas dans les standards de la mesure de température (mesure à l'ombre et sous abri). Il conviendra donc de recalibrer ces données. Pour cela, la première solution se présentant est d'utiliser les iButtons de recalage situés au droit des stations, et d'effectuer une correction sur l'ensemble du réseau à partir de ces différences. Cependant, cette correction va à n'en pas douter ajouter des incertitudes notables dans nos températures déjà sujettes à l'imprécision potentielle des appareils, et, nous ne souhaitons pas ajouter davantage d'erreur. En conséquence, nous allons utiliser une autre technique.

Comme nous allons le voir dans la section suivante, lors de l'interpolation des températures, nous allons utiliser l'ensemble du réseau et calculer le champ de température à partir de tous les iButtons. Une fois ce champ calculé, nous n'allons pas utiliser les valeurs de températures absolues, mais plutôt les différences qu'il existe entre les sites. Ainsi, pour un site donnée, nous connaissons la différence à appliquer par rapport à une station de référence (3 stations météorologiques). De fait, nous allons utiliser le réseau de iButton pour travailler de manière relative, par rapport aux stations de références. Cette technique présente en outre l'avantage indéniable de conserver les "imprécisions" de mesures effectuées sur les iButtons, en cas de trop forte ou faible exposition au soleil par exemple, qui bien souvent sont en réalité le marqueur de l'hétérogénéité des températures sur le versant. Au final, nous aurons donc un champ de température calculé en fonction de l'altitude et de l'ensoleillement, et, on reportera ces températures sur les stations de référence. On notera que cette approche nous permet indirectement de prendre en compte l'impact de l'exposition puisque l'on utilise des températures impactées par l'ensoleillement direct ou l'ombrage, du fait des non-corrrections immédiates des températures enregistrées. .

En conclusion, l'analyse des températures des iButtons nous a montré que l'élément essentiel de variation des températures outre l'altitude est la variation de l'ensoleillement sur le versant, qui souffre d'une dualité NE/SO. Cependant, grâce au calcul de différents gradients, et au travail en relatif par rapport aux stations, il semble que nous serons en mesure de prendre en compte ces hétérogénéités locales dans le calcul du champ de températures. Ainsi, nous allons maintenant présenter les différentes techniques développées nous permettant de calculer les variations des températures sur le versant en temps réel.

Section 12.2

Méthodes de calcul et d'interpolation des températures :

Au cours de ce travail, nous avons développé plusieurs méthodes permettant de calculer la température en tout point du bassin versant. Ainsi, nous allons présenter ici une méthode particulièrement légère mais donnant des résultats assez généraux et proches des tendances saisonnières mises en évidence dans la section précédente. La seconde méthode qui sera présentée permet quand à elle de tenir compte des hétérogénéités spatiales infra-journalières à la surface du bassin versant.

12.2.1 Interpolation des températures à partir des gradients thermiques :

La méthode la plus simple pour calculer une température sur un bassin versant de montagne est sans aucun doute d'utiliser un gradient thermique et de l'appliquer à tous les points du bassin, à partir d'une station de référence. Cependant, dans notre cas, nous avons mis en évidence une variation de ce gradient à la fois au cours de l'année, en fonction de la saison, mais également au cours de la journée en particulier du fait de la course du soleil impliquant des zones d'ombres variables. Ainsi, afin de tenir compte de ces deux paramètres, il est nécessaire d'utiliser les deux types de gradients. Pour cela, nous allons utiliser les valeurs calculées dans les tableaux 12.1 et 12.2 des gradients mensuels et horaires. Au cours de nos futures modélisations, il est possible que dans certains cas, nous souhaitions modéliser un comportement général des températures, en particulier afin d'accélérer les temps de calculs, mais également pour étudier les impacts précis des modifications des facteurs de fonte par exemple. Ainsi, une méthode de calcul très générale pourra se révéler très utile.

Le principe de cette méthode est donc relativement simple et repose sur l'estimation de gradients thermiques généraux en fonction de l'heure et de la saison, à partir du réseau de iButtons présents sur le versant. Cependant, compte tenu de l'incertitude de mesure que possède ces capteurs, nous n'allons les utiliser que de manière relative, c'est-à-dire à partir des différences absolues que l'on observe entre eux. Par la suite, nous aurons donc besoin d'avoir recours à une station de recalage sur le versant. Sur le Vorz, nous disposons de 3 stations météorologiques classiques que nous allons utiliser à cet escient. De fait, pour chaque point de la grille MNT, on déterminera quelle est la station la plus proche, et, on appliquera la gradient thermique souhaité à partir de cette station et de sa différence d'altitude.

Dans un second temps, le problème majeur est de déterminer le gradient adéquat pour une situation donnée. Nous allons pour cela utiliser les gradients calculés précédemment en mettant en avant les tendances saisonnières (gradients mensuels), ainsi que les variations journalières de l'ensoleillement (gradients horaires). Ces deux gradients sont calculés sur l'ensemble du bassin versant à partir des capteurs iButtons, et, ils seront compilés de la manière suivante :

$$\text{Gradient thermique} = a \cdot \text{Gradient}_{\text{Mensuel}} + b \cdot \text{Gradient}_{\text{Horaire}} \quad \text{avec : } a+b=1 \quad (12.1)$$

Dans la plupart des cas, et de manière à ne pas biaiser les estimations de températures en donnant plus d'importance à un paramètre qu'à l'autre, on considérera que les deux gradients ont la même importance dans le calcul de la température. Les gradients que nous allons utiliser

CHAPITRE 12. INTERPOLATION DES TEMPÉRATURES À PARTIR DU RÉSEAU :

sont donnés dans les tableaux 12.1 et 12.2 en $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.

L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'il ne permettra pas de simuler des comportements locaux particuliers. Il est par exemple impossible avec cette méthode de simuler une inversion thermique à l'échelle du bassin, puisque les gradients thermiques sont globaux et donc constants sur le bassin. De même, les disparités d'expositions ne seront pas forcément mises en évidence avec une telle méthode. Cependant, elle nous permettra d'accéder rapidement à des champs de températures peu sujets aux incertitudes par rapport à la tendance générale, mais également indépendants de certains facteurs (exposition, changements thermiques locaux), que l'on souhaite analyser, ou dont on veut limiter l'importance pour en étudier l'impact sur la fonte par exemple. Dans ce cadre cette méthode sera utilisée en première approche, puis, complétée par une méthode plus précise permettant de modéliser les hétérogénéités locales.

12.2.2 Interpolation des températures du versant par génération des gradients locaux :

La seconde méthode que nous avons développée au cours de ce travail est fondée sur le calcul des gradients locaux à partir de l'ensemble du réseau iButton. Dans un premier temps, l'ensemble du bassin versant est découpé en bandes d'altitudes régulières dont la taille peut être ajustée. Dans notre cas, compte tenu du nombre de iButtons, et pour conserver un minimum de précision, à savoir au minimum 2 iButtons par zone, on utilisera des bandes d'altitude de 250 mètres de dénivelée. A l'intérieur de chaque bande d'altitude, on fait le bilan du nombre de iButtons disponibles, comme le montre la figure 12.3. Ainsi, en fonction des différences de température et d'altitude, on calcule pour chaque bande d'altitude la valeur du gradient thermique local.

Comme on l'a vu dans la première partie, les iButtons sont susceptibles d'être entachés d'incertitudes de mesures importantes au niveau de la température absolue. De fait, nous n'allons les utiliser que de manière relative. En réalité, on va calculer dans un premier temps les gradients locaux, puis, on va utiliser ces gradients pour calculer les variations de températures par rapport aux 3 stations météorologiques de référence. Cette opération sera effectuée pour chaque pixel MNT, et on utilisera la station la plus proche géographiquement pour effectuer le recalage. De fait, l'incertitude en chaque point quant à la température absolue sera en grande partie corrigée par l'utilisation des stations de référence, mais, nous conserverons l'idée de l'importance des différences de températures entre deux points due à des phénomènes extérieurs (ombre, soleil, vent,...). Au final, la méthode va donc se dérouler en plusieurs phases distinctes :

1. Zonage du bassin versant : Découpage en bandes d'altitude (par défaut 250 mètres) permettant de conserver un nombre de iButtons conséquents dans chaque zone.
2. Calcul du gradient local : Pour chaque zone d'altitude et pour un pas de temps donné, on calcule le gradient local en fonction des températures enregistrées et de l'altitude des iButtons

$$\text{Gradient}_{\text{bande altitude}} = \sum_1^{NbB} \frac{T_{iB} - T_{(iB+1)}}{Z_{iB} - Z_{(iB+1)}} \quad (12.2)$$

3. Détermination de la station la plus proche : Pour chaque point, on détermine dans un premier temps la station de référence la plus proche. Pour cela, on utilise le critère de

12.2. MÉTHODES DE CALCUL ET D'INTERPOLATION DES TEMPÉRATURES :

distance entre les stations.

$$Station_{REF} = \text{Min}[dist_{Station-PointXY}] \quad (12.3)$$

4. Calcul de la température en un point x,y du versant : Lorsque l'on a déterminé la station la plus proche de notre point de calcul, on détermine le nombre de bandes d'altitudes traversées par la différence d'altitude entre la station et le point, et, pour chaque bande, on applique le gradient local correspondant.

$$T_{X,Y} = T_{Station} + \sum_{bande=1}^n Grad_{bande} \cdot \Delta Z_{bande} \quad (12.4)$$

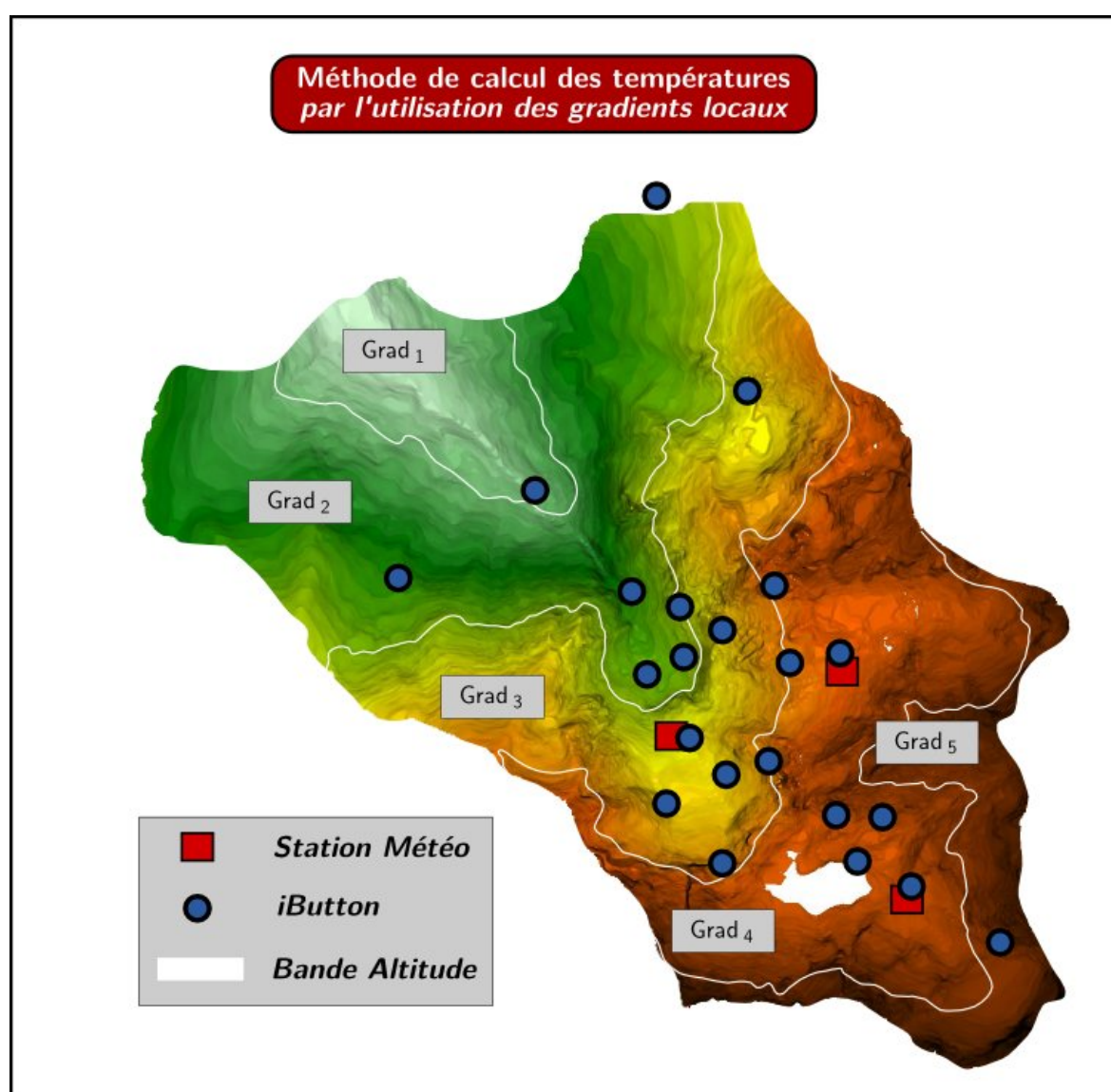


FIG. 12.3: Principe de calcul des gradients locaux sur le bassin versant du Vorz

Cette méthode permet de prendre en compte les hétérogénéités du bassin versant en terme de température, bien qu'elle ne permette pas d'inclure directement les variations d'ensoleillement et d'exposition sur le bassin. Cependant, lorsque l'on

CHAPITRE 12. INTERPOLATION DES TEMPÉRATURES À PARTIR DU RÉSEAU :

utilise l'ensemble du réseau iButton, on recueille des données de diverses orientations et situations, si bien que pour une heure donnée, en raison de la finesse des bandes d'altitude et de la morphologie du terrain, il est possible comme nous le verrons par la suite, d'observer des différences dans la répartition des températures en relation par exemple avec l'exposition. Malgré tout, cette méthode repose essentiellement sur les différences de températures liées à l'altitude et permet de simuler des phénomènes météorologiques particuliers compte tenu de la spatialisation des iButtons et de leur grande hétérogénéité de localisation. En d'autres termes, cette méthode que nous utiliserons dans nos modélisations, nous permet par des mécanismes relativement simples de dresser la carte des températures sur le versant au pas de temps horaire, avec des résolutions de l'ordre de la dizaine de mètres.

Section 12.3

Génération des cartes de températures au pas de temps horaire :

Maintenant que les mécanismes de génération des cartes de températures ont été présentés, nous allons voir quelques premiers résultats sur des journées spécifiques, recueillies dans notre base de données, pour chaque saison, dans différentes situations. Dans un second temps, nous verrons que la méthode des gradients locaux permet de simuler des phénomènes météorologiques spécifiques tels que des inversions de températures, mais également de mettre en évidence l'impact de différents paramètres morphologiques tels que l'exposition, la position et l'encaissement dans le versant, ou encore l'exposition en fonction de la saison.

12.3.1 Générations des cartes de températures journalières :

La méthode des gradients permet de générer des cartes de températures au pas de temps horaire. Dans cette section, nous allons observer quelques résultats sur des journées particulières du point de vue des températures sur le versant du Vorz.

12.3.1.1 Printemps : *Exemple du 8 Mars 2010* :

Bien que l'on ne soit pas à proprement parlé au printemps, cette journée présente un comportement assez typique de cette saison. En effet, la température présente des amplitudes de près de $30^{\circ}C$ au cours de la journée. Ainsi, on passe de températures très froides durant la nuit à des températures bien plus clémentes durant la journée, pouvant même être élevées pour ce type d'altitude à cette saison. L'élément le plus marquant de cette journée est l'inversion thermique qui s'y produit durant la deuxième partie de la journée. Cette inversion est relativement peu marquée et en réalité, on assiste plutôt à une homogénéisation des températures sur le versant, en raison des zones de basses altitudes situées dans les parties ombragées, tandis que les sommets sont exposés au soleil et se réchauffent davantage, compensant alors leur position en altitude.

12.3.1.2 Été : *Exemple du 1^{er} Juillet 2010* :

Cette journée présente la particularité d'être la plus chaude enregistrée sur le Vorz depuis octobre 2009. Les températures s'échelonnent de 10 à $30^{\circ}C$ et restent élevées même la nuit pour des altitudes proches de 3000 mètres. On peut observer que les températures aux heures les plus chaudes sont particulièrement élevées et remontent assez profondément dans les "gorges" du Vorz qui sont à cette période exposées au soleil dès le début de l'après-midi. En altitude, les températures restent malgré tout plus raisonnables mais ne sont pas très variables comparées à celle de la partie basse, notamment en raison des phénomènes d'ombrages qui se produisent dans les parties les plus encaissées du bassin versant.

12.3.1.3 Automne : *Exemple du 15 octobre 2009* :

L'exemple présenté ici est typique des journées automnales, avec des températures assez homogènes sur l'ensemble du bassin versant (entre $-5^{\circ}C$ et $10^{\circ}C$). On observe une homogénéisation des températures dans le début de la matinée, puis, les parties médianes se



FIG. 12.4: Evolution des températures pendant une journée printannière sur le Vorz

12.3. GÉNÉRATION DES CARTES DE TEMPÉRATURES AU PAS DE TEMPS HORAIRE :



FIG. 12.5: Evolution des températures pendant une journée estivale sur le Vorz



FIG. 12.6: Evolution des températures pendant une journée automnale sur le Vorz

12.3. GÉNÉRATION DES CARTES DE TEMPÉRATURES AU PAS DE TEMPS HORAIRE :



FIG. 12.7: Evolution des températures pendant une journée hivernale sur le Vorz

CHAPITRE 12. INTERPOLATION DES TEMPÉRATURES À PARTIR DU RÉSEAU :

réchauffement plus fortement que les sommets, sans toutefois atteindre des valeurs extrêmement importantes. On observe un pic des températures en fin d'après-midi, et, celles-ci se refroidissent rapidement dès lors que l'essentiel du versant est à l'ombre.

12.3.1.4 Hiver : *Exemple du 17 Décembre 2009* :

Au cours de cette journée, une couverture nuageuse se met en place sur la partie basse du versant durant la matinée. Ainsi, on observe des températures assez homogènes avec des températures rafraîchies dans la partie basse par la présence de nuages, et, dans le même temps, le soleil réchauffe la partie haute du versant. Dès lors que la couverture nuageuse disparaît en fin de matinée, comme c'est souvent le cas à cette période, les phénomènes cessent et la logique des températures est respectée. On observe également durant cette journée un changement de situation météorologique, puisque les températures se réchauffent durant la première partie de la nuit. En effet, alors que la journée du 17 est ensoleillée, la journée du 18 voit se produire des chutes de neige conséquentes sur le versant et on passe probablement d'une situation anticyclonique avec des masses d'air froides à une situation dépressionnaire de régime d'ouest dont les températures sont moins basses, comme cela se produit en hiver.

12.3.2 Modélisation de phénomènes météorologiques spécifiques : *l'Inversion Thermique* :

Un des moyens les plus efficaces pour déterminer la validité d'une méthode est d'essayer de simuler des comportements spécifiques et exceptionnels. En ce sens, les inversions thermiques sont un bon exemple. En effet, elles ne sont modélisables que si l'on est capable de dissocier les températures localement, car en utilisant un gradient général, cette modélisation est impossible. Pour cela, nous avons utilisé la journée du 11 février 2010, durant laquelle se produit une telle inversion. La figure 12.8 présente les images enregistrées par les deux caméras du Vorz ce jour-là. On constate ainsi que tandis que la partie haute du bassin versant reste ensoleillée toute la journée, tandis que la partie basse est sous une couverture nuageuse l'essentiel du temps. Ainsi, les températures sont réchauffées par le soleil dans la partie haute, et restent basses au pied du bassin versant. Ces observations sont confirmées par les mesures effectuées au niveau des stations météorologiques et mettent en évidence une inversion thermique entre 10h et 17h (cf. graphique figure 12.8).

La figure 12.9 présente les résultats de modélisations pour plusieurs heures clefs de la journée. Au lever du soleil, les températures sont dans une situation normale, mais, lorsque celui-ci commence à chauffer la partie haute du versant, la situation s'inverse et tandis que les versants exposés au soleil se réchauffent, la partie basse a même tendance à se refroidir (effet de "bulle froide" et humide). Cette situation dure tout l'après-midi, et, le retour à la normale ne se fait que lorsque le soleil arrête de chauffer le haut du versant et que les températures commencent à diminuer. On observe alors un retour à la normale et la disparition de l'inversion.

Cet exemple permet de montrer la possibilité de simuler des événements météorologiques spécifiques et très localisés avec notre méthode. Ainsi, nous pourrions l'utiliser dans nos futures modélisations en considérant que la variabilité spatiale de nos températures est relativement cohérente avec celle que l'on peut trouver dans la réalité.

12.3. GÉNÉRATION DES CARTES DE TEMPÉRATURES AU PAS DE TEMPS HORAIRE :

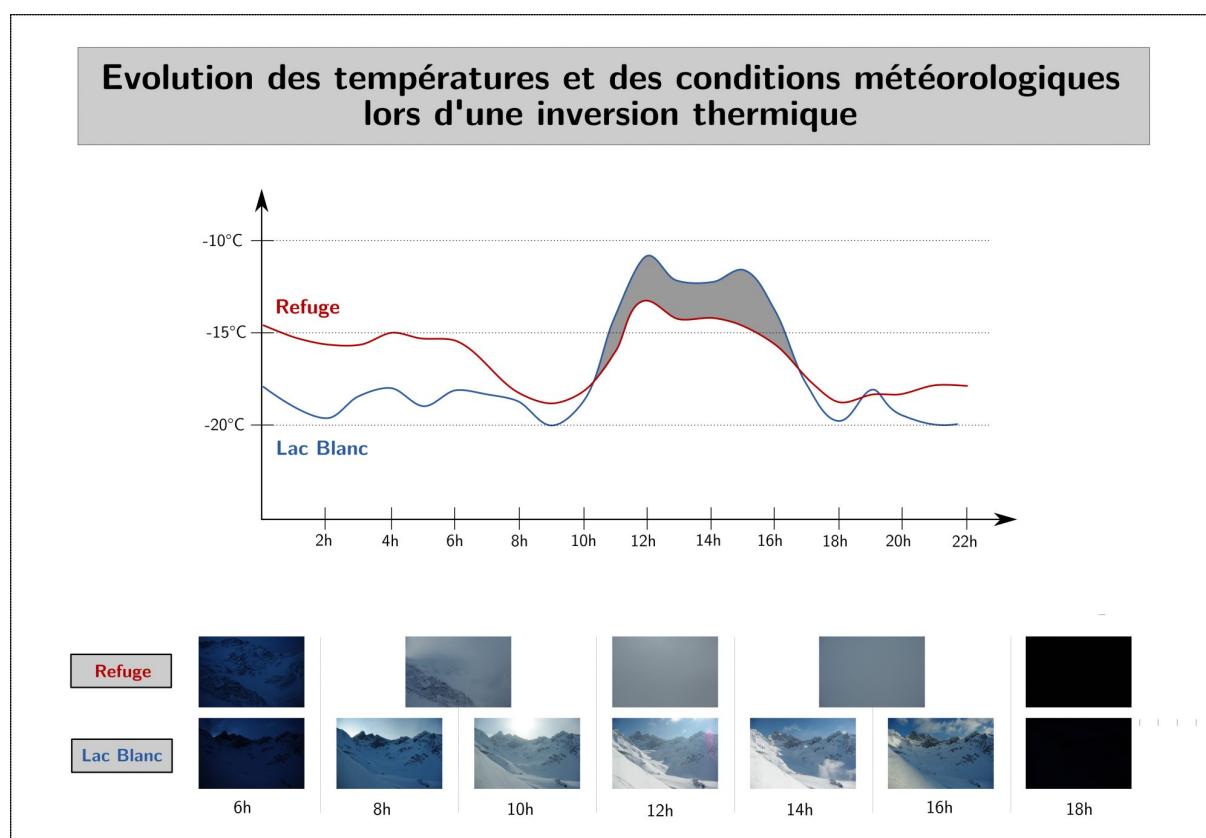


FIG. 12.8: Exemple d'une inversion thermique sur le Vorz

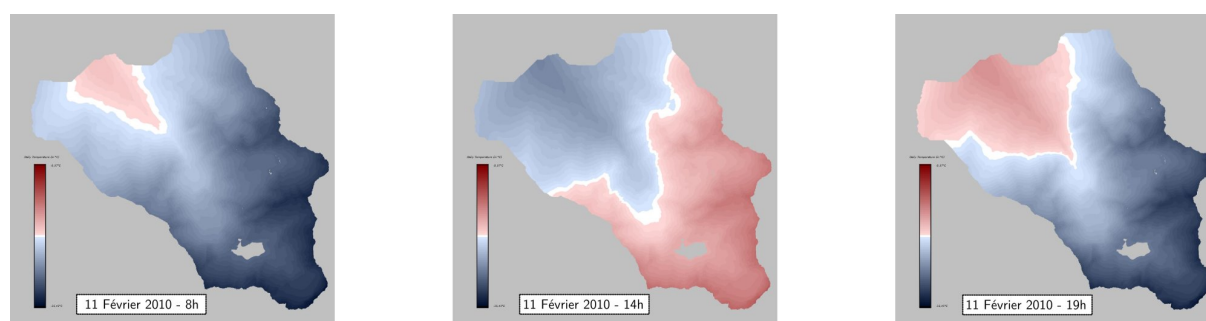


FIG. 12.9: Evolution des températures durant une inversion thermique

12.3.3 Modélisation de l'impact de l'exposition sur les températures en fonction des saisons :

A l'origine, la méthode des gradients locaux n'a été développée que dans le but de travailler avec des gradients altitudinaux et donc, nous nous attendions à n'obtenir des températures spatialisées, uniquement en fonction de l'altitude. Cependant, après des analyses approfondies de plusieurs séries de simulations, nous avons pu mettre en évidence certaines tendances liées à la morphologie locale du bassin versant. Ainsi, même si la morphologie et l'exposition ne sont pas prises en compte directement dans les calculs, le découpage en bandes d'altitude a pour résultat de zoner le bassin en fonction de certaines caractéristiques. En effet, la partie basse du versant par exemple, voit sa durée d'insolation varier au cours de l'année en fonction de la course du soleil, mais, dans le même temps, ces zones étant situées à faible altitude, elles

CHAPITRE 12. INTERPOLATION DES TEMPÉRATURES À PARTIR DU RÉSEAU :

sont regroupées dans le même ensemble. En d'autre terme, nous prenons en compte certains paramètres morphologiques au cours du zonage. Il est ainsi possible d'observer des différences dans l'évolution des températures en fonction de la saison, comme le montre la figure 12.10.

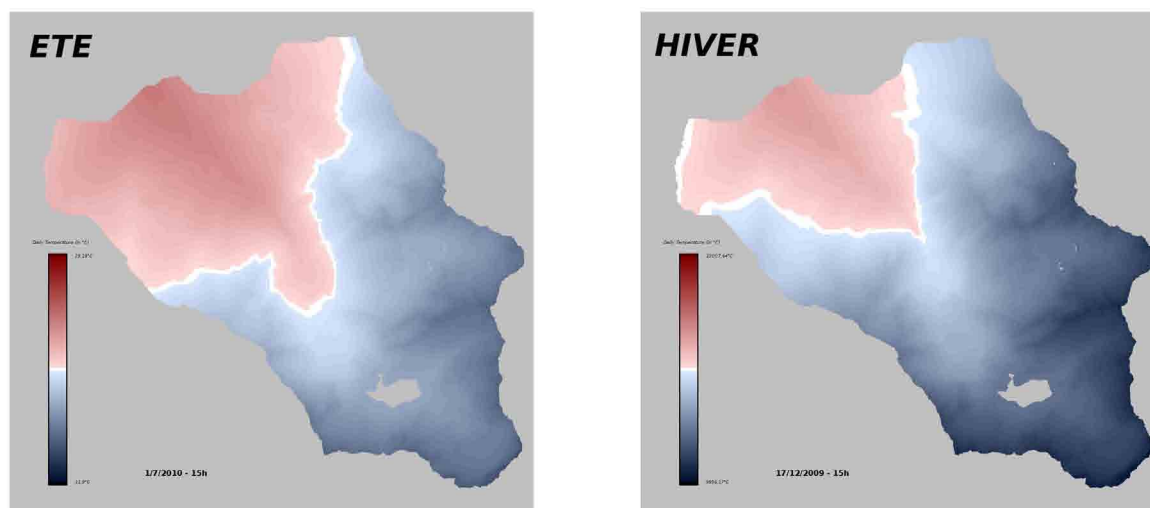


FIG. 12.10: Influence de la position et de la morphologie du versant dans la course du soleil et sur les températures en fonction de la saison

On pourra remarquer sur ces cartes des différences notables entre l'été et l'hiver. Ainsi, si l'hiver les températures restent froides pour une heure donnée, en été, on observe que le versant ouest se réchauffe considérablement, et que dans le même temps, les températures remontent plus en avant dans jusqu'au niveau du Mousset. De fait, cette forme caractéristique du champ de température met en avant la prise en compte par l'intermédiaire des altitudes, et dans une certaine mesure, des expositions, mais surtout de la morphologie du bassin versant dont dépend la course du soleil. Il sera donc possible à certaines occasions de voir évoluer le comportement des températures en fonction de la position dans le bassin et de la course du soleil, et non pas uniquement en fonction de leur altitude.

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 12 :

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques d'analyses des données du réseau iButton, qui nous ont permis de caractériser de manière générale le comportement thermique du bassin versant. De plus nous avons montré qu'au travers des différentes méthodes que nous avons développées, il était possible de générer des cartes de températures horaires spatialisées, prenant en compte les hétérogénéités locales du champ de température.

Dans la première partie, nous avons vu que l'on pouvait déterminer des gradients thermiques plus précis que ce que l'on avait fait jusqu'à maintenant ($0,4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ en moyenne sur le bassin), en ajoutant une dimension temporelle. Ainsi, une analyse de ces gradients au pas de temps mensuel, puis horaire sur l'ensemble de la période a permis de définir deux séries de gradients, permettant de mieux représenter les variations de températures journalières et horaires. Il est évident qu'une analyse encore plus fine peut être effectuée en cumulant encore les critères gradient/heure/mois, mais nous ne sommes ici que dans le cadre d'une analyse générale des données de températures.

L'étude des différences entre stations de mesures et iButton a montré qu'il était nécessaire de recalibrer le système. Cependant, afin de s'affranchir de cette étape et de ne pas introduire d'erreur supplémentaire (critère de correction variable), nous avons mis en évidence qu'il était judicieux de travailler sur des différences de températures locales relatives, qui sont en fin de processus reportées sur les mesures précises effectuées aux stations.

Dans un second temps, les méthodes de détermination des cartes de températures horaires ont été présentées. Nous possédons ainsi des méthodes de complexités différentes permettant de générer ce type de cartes.

- 1. Interpolation des températures à partir de gradients thermiques généraux (horaires et mensuels), qui s'inspire du comportement thermique général du bassin versant et donne donc des tendances lisées mais robustes.*
- 2. Interpolation à partir des gradients locaux qui utilisent les températures locales précises pour un pas de temps donné (horaire) et donne donc un champ de température reflétant la dynamique du bassin.*

Ces deux méthodes permettent de générer des cartes dont nous nous devons d'étudier la précision et pertinence.

L'étude de la pertinence des cartes des température fait l'objet d'une analyse spécifique. A partir de phénomènes locaux particuliers (inversions, forts gradients) très variables spatialement et temporellement (heure, jour, saison,...), on a pu estimer la validité de la méthode, et sa capacité à représenter les hétérogénéités

CHAPITRE 12. INTERPOLATION DES TEMPÉRATURES À PARTIR DU RÉSEAU :

observées sur le bassin versant, au travers de différentes situations. Les cartes de température seront donc utilisables pour les futures études nivologiques et hydrologiques. Au cours des prochains chapitres, nous verrons comment ces températures influent sur le manteau neigeux, et, de quelle manière on peut les utiliser pour se diriger vers une modélisation distribuée du stock de neige sur le versant du Vorz.

12.3. GÉNÉRATION DES CARTES DE TEMPÉRATURES AU PAS DE TEMPS HORAIRE :

Chapitre 13:

Contraintes des modèles nivologiques et hydrologiques :

Sommaire du Chapitre:

13.1 Utilisation des données des iButton-Sol :.....	311
13.1.1 Détection des dates clés pour le manteau neigeux :	311
13.1.2 Détermination des périodes de début d'accumulation :	313
13.1.3 Calcul de la vitesse d'ablation du manteau neigeux :	314
13.2 Utilisation d'images ponctuelles SnoDEC :	317
13.2.1 Détermination de la limite pluie/neige :	317
13.2.2 Détection de l'altitude de fonte :	320
13.3 Utilisation des cartes d'enneigement :	324
13.3.1 Analyse qualitative du comportement du couvert nival :	324
13.3.2 Analyse quantitative du comportement du couvert nival :	327
13.4 Première approche du calcul du facteur de fonte :	330
13.4.1 Méthode de calcul d'un facteur de fonte local :	330
13.4.2 Spatialisation du facteur de fonte :	331

Introduction du Chapitre 13 :

Le réseau de mesure mis en place sur le Vorz présente la particularité de recueillir un nombre important d'informations ponctuelles, et parfois partielles, pouvant être exploitées de manière directe ou indirecte. De plus, il est possible de combiner ces différentes sources de données pour obtenir des informations sur des phénomènes précis, locaux, ne pouvant la plupart du temps pas être observés directement. Dans le cas du bassin versant du Vorz, plusieurs sites de mesure permettent d'acquérir des données d'imageries utilisées pour quantifier l'évolution de la couverture neigeuse. Ces images et cartes constituent une source de données considérable, et il est possible d'en extraire de nombreuses informations annexes.

A travers ce système, il sera donc possible d'alimenter les futurs modèles implémentés, d'informations ponctuelles, pouvant nous permettre de les contraindre, ou encore d'améliorer les données d'entrées en ajoutant des informations ponctuelles spatialement ou localement. Nous allons présenter ici quelques une de ces informations qui peuvent être utilisées.

Nous nous intéresserons dans un premier temps aux données des iButtons sols. Nous verrons qu'il sera possible de déterminer des dates de début d'enneigement, de fin de fonte et d'obtenir des informations sur la vitesse des phénomènes (fonte, accumulation,...).

Dans un second temps, on verra que les images du système SnoDEC peuvent être ré-utiliser pour analyser des facteurs comme la limite pluie/neige ou l'altitude d'ablation.

De la même manière, l'analyse des cartographies d'enneigement permet de calculer des données quantitatives sur le comportement de la couverture nivale au cours de la saison.

Enfin, en conclusion, nous verrons comment en combinant les données d'imageries et de divers capteurs du bassins (températures, précipitations,...), il est envisageable de calculer des facteurs qui sont habituellement calibrés au sein des modèles.

Section 13.1

Utilisation des données des iButton-Sol :

Les iButtons placés dans le sol apportent des informations importantes sur les conditions régnant à l'interface avec le manteau neigeux en période hivernale, et donnent également des indications de premier ordre en ce qui concerne l'état de surface du sol et en particulier son gel ou non. L'ensemble de ces informations peut être extrait après analyse des chroniques dont nous disposons.

13.1.1 Détection des dates clés pour le manteau neigeux :

La détection des principaux changements à l'interface Sol-Air ou Sol-Neige se fait de manière assez basique. En effet, ce type de transition étant relativement peu courant au cours de l'année, un simple contrôle manuel est suffisant. On remarquera particulièrement bien les transitions par un arrêt des oscillations infra-journalières de la température du sol, ou au contraire leur reprise (cf. figure 13.1). Un autre indice de changement de situation peut être le passage à un état de gel prononcé du sol, ce qui met généralement en évidence une absence de manteau neigeux lors de périodes de grand froid. Dans notre cas, on s'intéressera principalement aux dates clés de l'évolution du manteau neigeux à savoir sa date de mise en place et celle de sa disparition effective. La plupart du temps, le repérage de ces transitions est assez aisé, puisqu'il est très marqué et peut même être détecté à quelques heures près dans la plupart des cas.

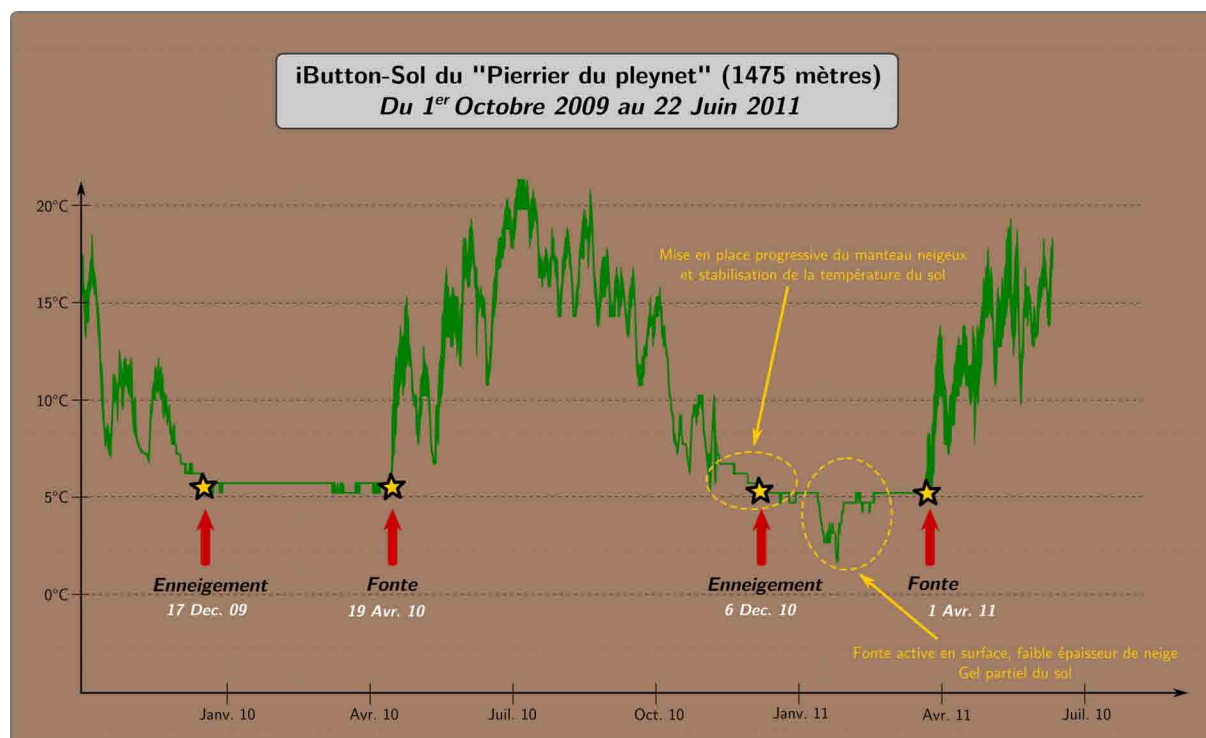


FIG. 13.1: Exemple d'un enregistrement des températures par un iButton-sol

13.1. UTILISATION DES DONNÉES DES IBUTTON-SOL :

13.1.1.1 Début d'accumulation de la neige :

La date de début d'accumulation du manteau neigeux se détecte sur les chroniques de températures par un arrêt de l'oscillation diurne/nocturne que l'on observe de manière tamponnée le reste de l'année. Lorsque ces oscillations cessent, elles traduisent la mise en place de la couverture neigeuse, même si la température peut décroître encore par palier. En effet, la température du sol étant positive durant la période automnale, on observe un décalage temporel avant d'atteindre la température d'équilibre définitif proche de 0°C pour le reste de l'hiver. Une petite difficulté peut être la présence de chutes de neige automnales qui fondent entièrement et peuvent être détectées comme un début d'accumulation. Afin de nous prémunir d'erreur de pointage, nous n'utiliserons ici que des dates pour lesquelles nous n'observons plus d'oscillations significatives par la suite. En conséquence, les dates utilisées seront des "maxima" en terme de non-couverture du sol par la neige.

Le tableau 13.1 présente les dates de début d'accumulation pour les saisons 2009 et 2010 et met en évidence une couverture du bassin versant définitive assez rapide. Ces premières chutes de neige se produisent généralement entre la mi-October et la mi-Novembre suivant les années.

Site	Altitude	Exposition	Début Accumulation 2009	Début Accumulation 2010
Pré-Long	1350	NE	30/11/09	16/11/10
Arbre Coude	1400	NE	30/11/09	19/10/10
Feuillu pierrier	1475	NE	30/11/09	16/11/10
Sapin pierrier	1500	NE	30/11/09	19/10/10
Falaise ouest	1800	NE	30/11/09	19/10/10
Falaise haute	1900	NE	19/10/09	<i>Pas de données iButton</i>
Pré-Marcel	1290	NO	16/11/09	<i>Pas de données iButton</i>
La Balme	1450	NO	16/11/09	<i>Pas de données iButton</i>
Rocher du diable	2200	NO	<i>Pas de données iButton</i>	<i>Pas de données iButton</i>
Glacier	2450	NO	<i>Pas de données iButton</i>	<i>Pas de données iButton</i>
Sapin Mousset	1700	O	<i>Pas de données iButton</i>	<i>Pas de données iButton</i>
Falaise Mousset	1750	O	30/11/09	19/10/10
Sentier Refuge	1895	O	19/10/09	<i>Pas de données iButton</i>

TAB. 13.1: Date du début de l'accumulation du manteau neigeux définitif pour chaque saison sur le Vorz

13.1.1.2 Disparition de la couverture neigeuse :

La disparition de la couverture neigeuse marque la fin d'une période durant laquelle la température du sol est tamponnée autour de 0°C . Cette transition est généralement très rapide et se produit de manière assez intense, en passant d'une situation stable à une reprise des oscillations en quelques heures seulement. De fait, la détection de cette période de transition est aisée dans les enregistrements des iButtons dont nous disposons.

Le tableau 13.2 récapitule les dates de fonte du manteau neigeux pour les deux saisons passées. Contrairement à l'accumulation qui se fait de manière quasi simultanée sur l'ensemble du bassin versant, la fonte se produit de manière progressive. Grâce à cette évolution temporelle, nous allons voir quelles sont les impacts de l'altitude et de l'exposition dans les mécanismes de fonte.

CHAPITRE 13. CONTRAINTES DES MODÈLES NIVOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES :

Site	Altitude	Exposition	Fin de la fonte 2010	Fin de la fonte 2011
Pré-Long	1350	NE	17/04/10	15/03/11
Arbre Coude	1400	NE	07/04/10	14/03/11
Feuil pierrier	1475	NE	19/04/10	01/04/11
Sapin pierrier	1500	NE	26/04/10	02/04/11
Falaise ouest	1800	NE	27/05/10	02/05/11
Falaise haute	1900	NE	15/06/10	02/06/11
Pré-Marcel	1290	NO	20/03/10	13/03/11
La Balme	1450	NO	23/03/10	26/03/11
Rocher du diable	2200	NO	05/06/10	18/05/11
Glacier	2450	NO	<i>Non relevé</i>	06/06/11
Sapin Mousset	1700	O	<i>Non relevé</i>	06/04/11
Falaise Mousset	1750	O	31/05/10	22/04/11
Sentier Refuge	1895	O	10/05/10	11/04/11

TAB. 13.2: Date de la fin de la fonte du manteau neigeux sur les sites iButtons du Vorz

13.1.2 Détermination des périodes de début d'accumulation :

Dès lors que la détermination de la date de début d'accumulation est effectuée, on peut la représenter en fonction de l'altitude, afin de déterminer l'impact de ce paramètre sur le comportement du début de formation du manteau neigeux. La figure 13.2 présente ces résultats pour les deux saisons disponibles.

Lors du début de l'hiver 2010-2011, on observe une mise en place progressive du manteau neigeux entre le 15 Octobre et le 15 Novembre environ (2 chutes de neige importantes). En réalité, une forte chute de neige s'est produite au milieu du mois d'Octobre (19 Octobre), et, dans certaines parties du bassin versant situé plus bas en altitude (en particulier au Nord-ouest), le manteau neigeux n'a pu se maintenir jusqu'à la chute de neige suivante (16 Novembre). Cette deuxième chute de neige a définitivement recouvert l'ensemble du bassin pour l'hiver à venir.

En ce qui concerne l'hiver 2009-2010, il a suffi d'un seul événement neigeux pour recouvrir définitivement l'ensemble du bassin (30 Novembre). Cet épisode a eu lieu à la fin du mois de novembre et montre que pour les altitudes médianes et basses du bassin qui sont les seules pour lesquelles nous disposons des données d'accumulation, le début de la période hivernale en terme hydrologique débute suivant les années entre la deuxième moitié d'octobre et le courant du mois de novembre.

13.1. UTILISATION DES DONNÉES DES IBUTTON-SOL :

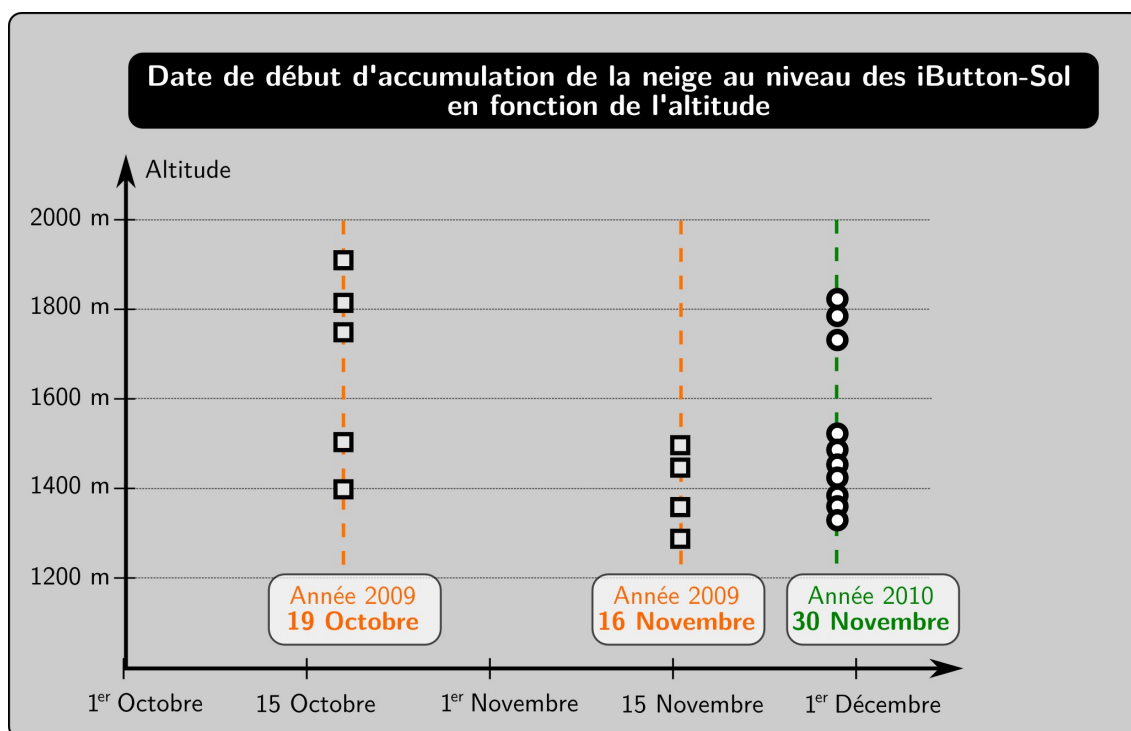


FIG. 13.2: Dates de début d'accumulation de la neige en 2009 et 2010 sur le Vorz

13.1.3 Calcul de la vitesse d'ablation du manteau neigeux :

La détermination des dates de fonte du manteau neigeux permet de déterminer dans plusieurs situations la vitesse d'ablation de la neige. Dans un premier temps, une analyse annuelle rapide met en évidence des comportements légèrement différents selon les années, mais dont la tendance générale reste la même. Pour quantifier ces vitesses d'ablations, une analyse statistique est utilisée pour calculer des vitesses en fonctions de l'altitude et de la date de la fonte. L'ensemble des données disponibles est présenté dans la figure 13.3.

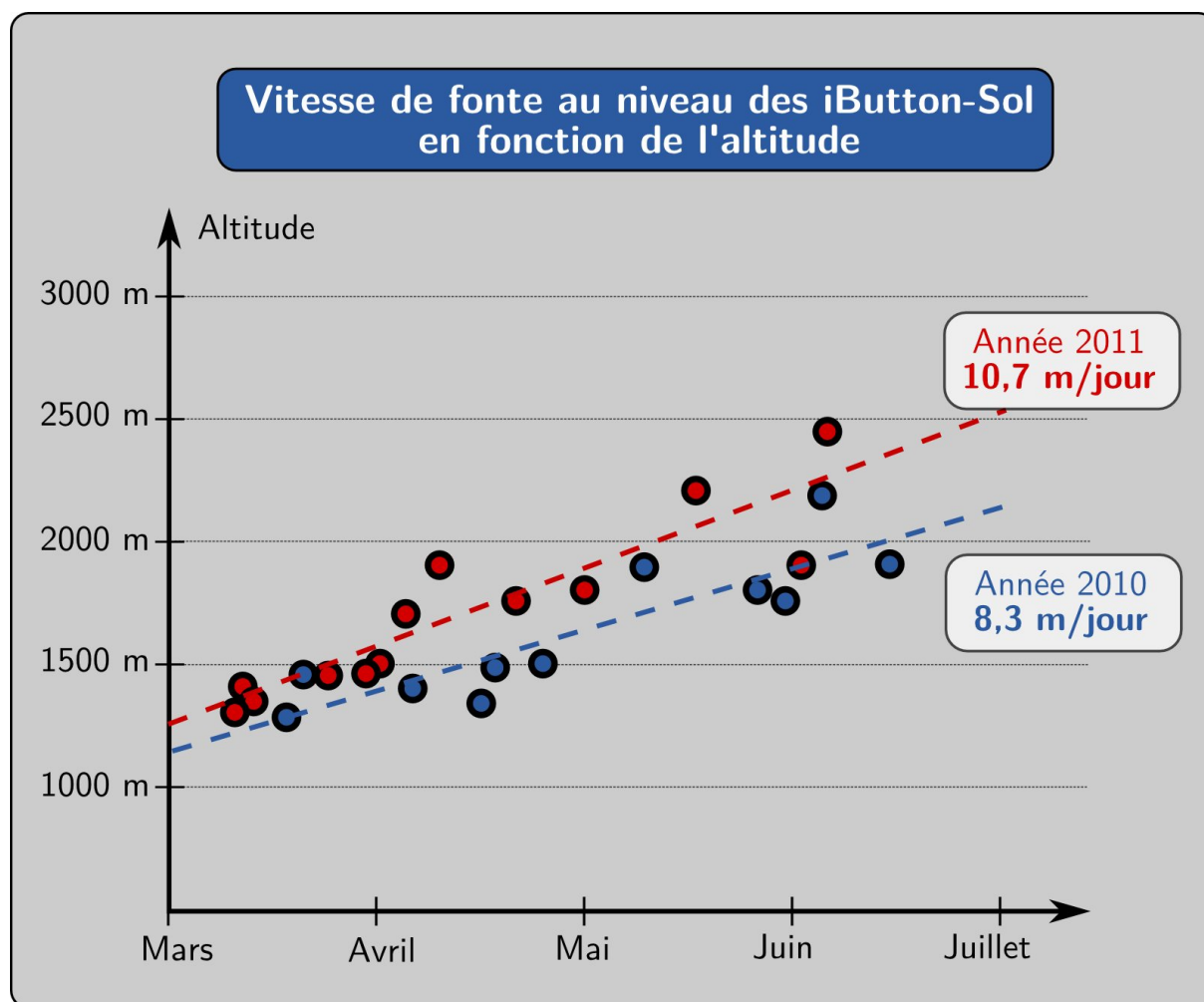


FIG. 13.3: Détermination des taux de fonte annuels sur le Vorz

Les vitesses de fonte calculées à partir des données figurant sur ce graphique montrent une bonne cohérence (10,7 m/jour contre 8,3 m/jour) du point de l'étagement et du dénivelé du bassin. En effet, les premiers déneigements ayant lieu au milieu du mois de mars, à environ 1200 mètres ces vitesses induisent une fonte "complète" du manteau neigeux à des altitudes de 2500 mètres pour le milieu du mois de Juillet, ce qui est conforme aux observations réalisées par les caméras SnoDEC.

Climatologiquement, on peut relativement bien expliquer la différence des vitesses de fonte entre les deux années. Durant la saison 2009-2010, le printemps a été peu précoce et des conditions hivernales ont perduré jusqu'au milieu du mois de mai, engendrant ainsi des vitesses d'ablation plus faibles. Au contraire, au cours de la saison 2010-2011, le printemps a été très précoce (avril) et chaud et a suivi un hiver assez peu neigeux. En conséquence, le manteau neigeux a fondu plus vite que la saison précédente, entraînant des différences de près de 3 semaines avec la saison précédente.

L'ensemble de ces données est interprété dans ce graphe uniquement en tenant compte de l'altitude, or, l'exposition est un paramètre qui entre également en compte dans la fonte de la neige. La figure 13.4 présente une analyse de ces paramètres.

13.1. UTILISATION DES DONNÉES DES IBUTTON-SOL :

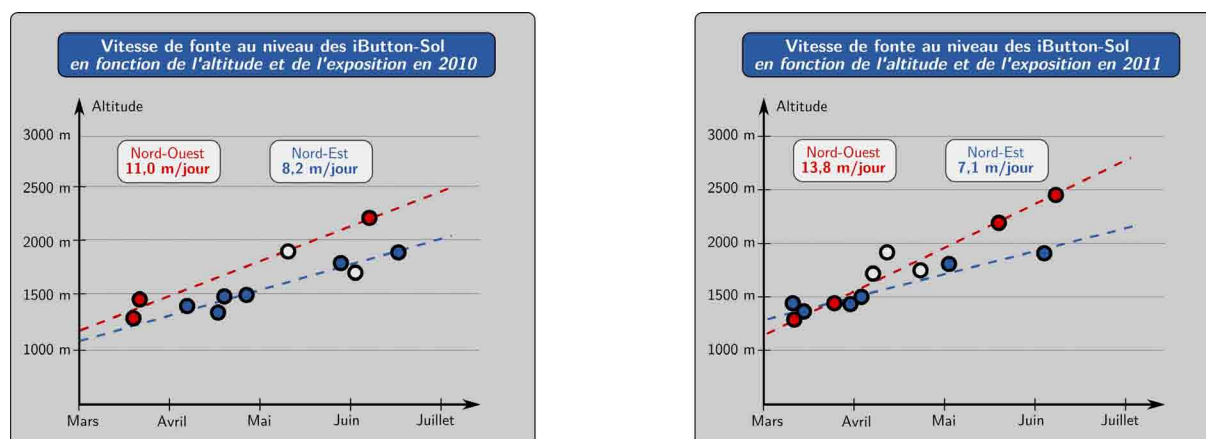


FIG. 13.4: Détermination des taux de fonte en fonction de l'exposition

Lorsque l'on prend en compte l'exposition dans le calcul des vitesses d'ablation, on observe une différence notable entre les deux principales orientations du bassin à savoir le *Nord-Ouest* et le *Nord-Est*. Ainsi, avec des vitesses différentes de l'ordre de 3 à 5 m/jour, on peut obtenir en fin de saison des différences d'altitudes d'enneigement entre les versants de près de 400 à 500 mètres de dénivelée. Ces différences peuvent être confirmées par les cartes d'enneigement et les images dont nous disposons sur le site du Lac Blanc.

Ces données mettent également en évidence la disparité de fonte sur les versants et donne l'avantage en terme de vitesse aux versants exposés au *Nord-Ouest*, qui sont impactés par un soleil plus efficace durant les heures les plus chaudes de la journée. Les différences entre les saisons 2009-2010 et 2010-2011 sont une nouvelle fois marquées par des différences entre les vitesses de fonte, en particulier en ce qui concerne l'exposition *Nord-Ouest*. Cette différence s'explique par un hiver peu neigeux et un printemps précoce comme évoqué précédemment, mais surtout, par un ensoleillement plus important en 2011 qui a considérablement réduit le manteau neigeux durant les mois de avril et mai. De plus, du fait des expositions et de la course du soleil sur le versant, la fonte a eu un effet moindre sur le versant *Est*, entraînant ainsi une plus grande disparité que durant la saison précédente où la fonte a été plus homogène.

Ainsi, l'ensemble de ces analyses des iButton-sol permet d'obtenir des informations très précises sur les modalités d'accumulation et de fonte à la surface du bassin versant. Outre la compréhension qualitative des mécanismes nivologiques qu'elles apportent, ces données quantitatives pourront quant à elle être utilisées dans de futures phases de modélisation, notamment pour contraindre le facteur de fonte par exemple.

Section 13.2

Utilisation d'images ponctuelles SnoDEC :

Dans la seconde partie de ce manuscrit, nous avons présenté le capteur SnoDEC que nous avons développé sur le bassin versant du Vorz depuis près de 3 ans. L'objectif de ce capteur est de réaliser la cartographie automatique de la couverture neigeuse à partir de simples images photographiques. Cependant, au delà de la simple évolution cartographique et des informations spatiales et temporelles que nous pouvons en retirer sur la couverture neigeuse, il est possible d'utiliser les données récoltées, de manière à apporter des informations supplémentaires sur différents phénomènes hydrométéorologiques. Ainsi, en combinant les informations contenues dans les images, de celles que l'on obtient par analyse des cartes, divers paramètres peuvent être mesurés, et pourront par la suite être utilisés lors des phases de modélisations nivologiques ou hydrologiques.

Nous allons voir dans cette section deux exemples de phénomènes que l'on peut mesurer en combinant les sources d'informations : la détermination de la limite pluie/neige lors d'un évènement pluvieux, et, la détection de l'altitude de la fonte du manteau neigeux.

13.2.1 Détermination de la limite pluie/neige :

Un des paramètres les plus importants à déterminer dans le calcul de la recharge hydrologique des bassins versants est l'altitude limite durant un épisode pluvieux entre la pluie et la neige. En effet, ce paramètre conditionne non seulement les possibilités de stockage lors d'un épisode neigeux, mais également la possibilité d'engendrer des fontes additionnelles (en complément de celle liée à la température) lors d'épisodes pluvieux. Comme on l'a dit précédemment, cette limite est extrêmement variable selon les épisodes, et parfois d'un versant à l'autre au sein d'un même évènement. En conséquence, l'observation de l'évolution du manteau neigeux lors d'épisodes perturbés permet de mettre en évidence des paramètres complémentaires, améliorant nos connaissances du phénomène, et potentiellement les modélisations. Nous allons donc utiliser notre base de données photographique, afin d'analyser les évènements pluvieux et de voir si il est possible d'en retirer des informations intéressantes.

13.2.1.1 Évènement du 21 Octobre 2009 :

Nous allons nous appuyer sur un exemple très courant de chute de neige automnale (21 Octobre 2009) qui a pour conséquence de déposer une légère couche de neige sur la partie haute du site du Lac Blanc. À l'aide des images précédant la chute de neige et celles lui succédant, en combinant les informations avec leur position spatiale (cartographie), il va être possible de déterminer des altitudes clef pour cet évènement (cf figure 13.5). Dans la pratique on commence par déterminer les différences entre les deux situations. Pour cela, on compare l'image prise par la caméra le matin du 21 octobre, et celle prise dans l'après-midi. Au premier constat, les différences dans la position de la neige montrent une altitude de chute relativement basse, ce qui est confirmé par l'analyse des cartographies associées. Le graphique 13.6 montre les différences de surfaces couvertes par la neige, mettant clairement en avant une augmentation de la surface au cours de la journée. Le premier enseignement que l'on peut retirer de cette analyse est qu'il est possible dans certains cas de détecter le déroulement d'un épisode neigeux

13.2. UTILISATION D'IMAGES PONCTUELLES SNODEC :

uniquement à partir des photographies. Ainsi, par exemple pendant la période hivernale, ce procédé pourrait être utilisé pour confirmer les mesures effectuées par les pluviomètres, et, le cas échéant de les corriger en cas de non enregistrement d'un épisode.

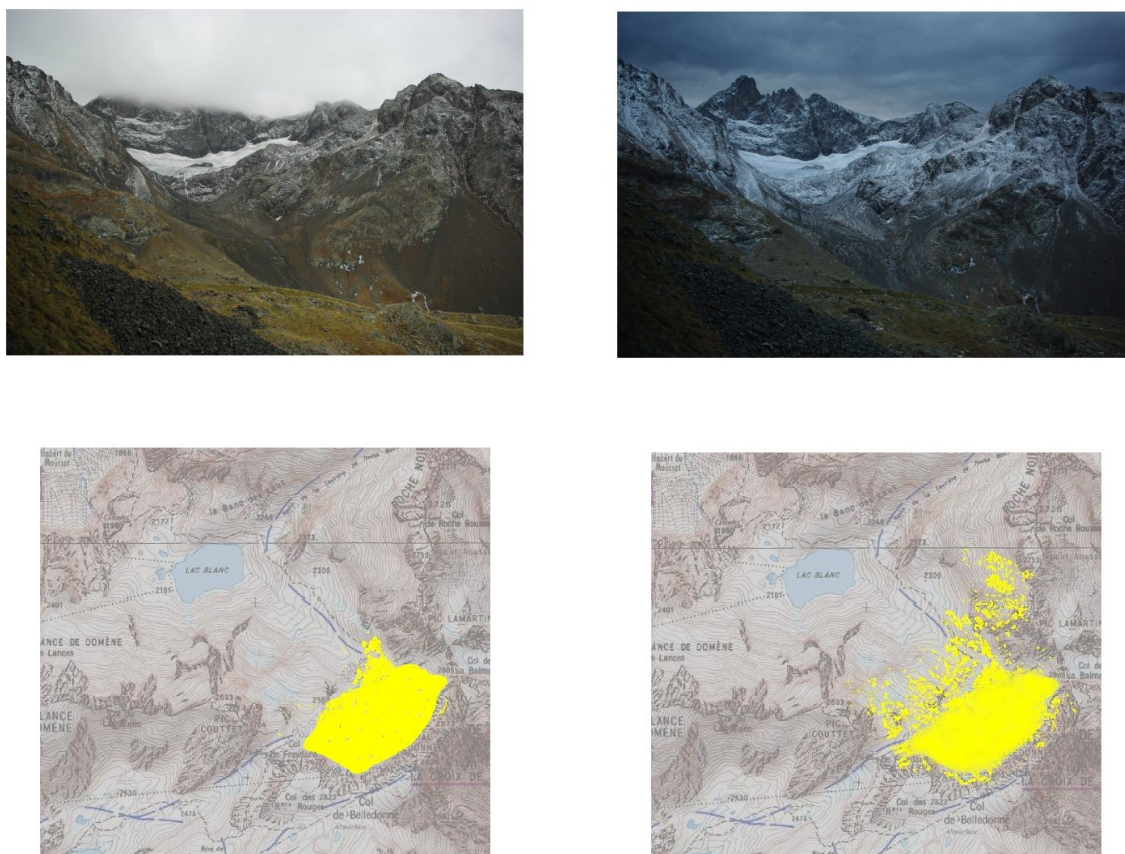


FIG. 13.5: Evolution des conditions d'enneigement au cours de la journée du 21 Octobre 2009

13.2.1.2 Détermination de l'altitude de la limite pluie/neige :

Dans un second temps, maintenant que nous avons une information sur le déroulement d'un épisode, nous allons nous attacher à le caractériser. Le paramètre le plus important et le plus simple à extraire est l'altitude à laquelle l'épisode neigeux s'est déroulé. En ce qui concerne son intensité, il est malheureusement difficile de tirer une conclusion précise, notamment en raison de l'incertitude du dispositif actuel dans la mesurer des hauteurs de neige sur les images (cf. Partie2, Chapitre 10). Les cartographies réalisées par le système SnoDEC permettent de réaliser une analyse rapide de la répartition du manteau neigeux en fonction de l'altitude. En comparant les données des deux cartes associées aux images, on peut observer les différences et déterminer les altitudes pour lesquelles on détecte un changement notable, ce travail a été effectué dans le graphique 13.7.

CHAPITRE 13. CONTRAINTES DES MODÈLES NIVOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES :

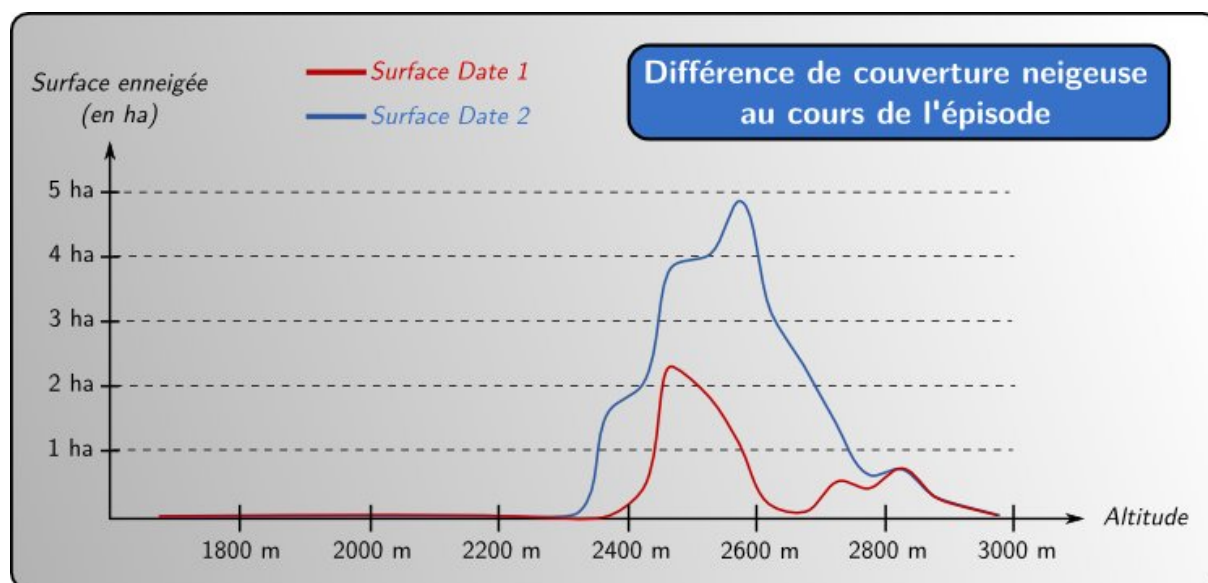


FIG. 13.6: Evolution des surfaces enneigées au cours de l'évènement

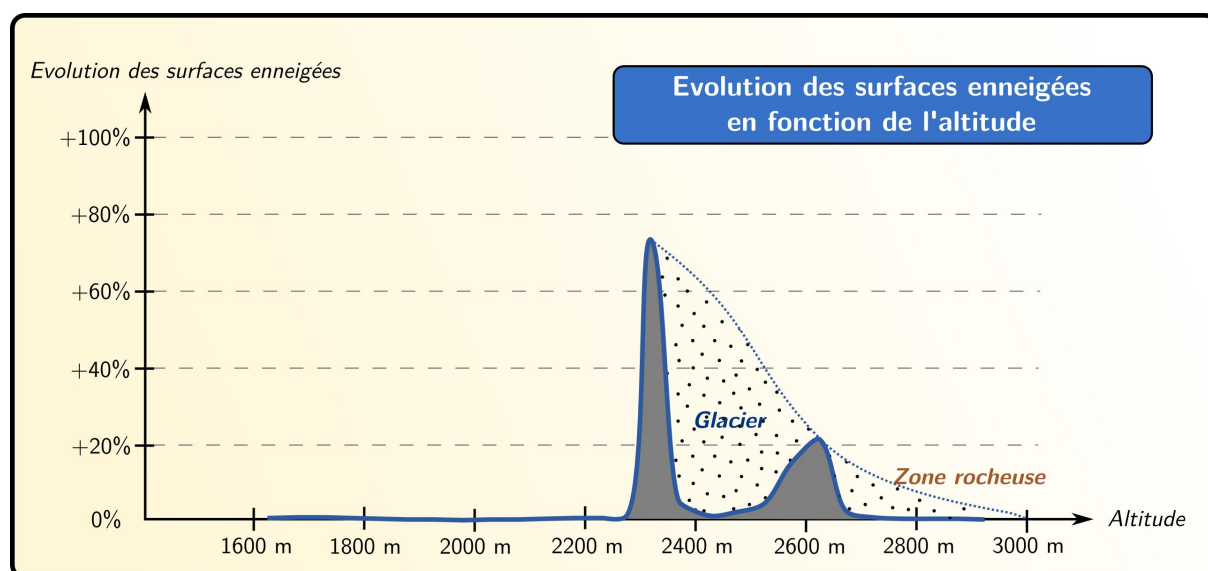


FIG. 13.7: Différence de répartition de la couverture neigeuse pour l'évènement étudié

Ce graphique met en évidence un premier pic de différence très important à environ 2300 mètres d'altitude. Puis, aux altitudes supérieures, la différence est très faible, du fait de la présence du glacier. En effet, cette zone étant enneigée avant l'épisode, et comme on ne raisonne que sur des surfaces enneigées et non pas des hauteurs, nous ne détectons que peu de changement dans cette zone. Plus haut, on observe à nouveau l'apparition de différences dues à l'accumulation de la neige (rochers de la base du Grand Pic de Belledune), puis, la présence de pente raides et de rochers ne permet plus une accumulation importante et la différence de couverture diminue. En conclusion, sur cet épisode, on observe une différence maximum à partir de 2350 mètres. Ainsi, il est possible de fixer la limite pluie/neige probable à environ 2350 mètres lors de cet épisode.

13.2. UTILISATION D'IMAGES PONCTUELLES SNODEC :

13.2.1.3 Mise en évidence et calcul de la température critique :

La détermination de la limite pluie/neige permet de calculer un nouveau paramètre. En effet, comme nous disposons sur le versant de stations météorologiques, on peut connaître les températures durant l'épisode. Ainsi, à l'aide de ces stations, des gradients généraux, et des méthodes présentées dans le chapitre précédent, on peut calculer la température de la limite pluie/neige durant l'épisode neigeux. En réalité, ce calcul correspondant à la détermination de la température critique de cet événement.

Le graphique 13.8 montre l'évolution des températures et précipitations à la station du Lac Blanc durant l'épisode du 21 octobre. On observe ainsi une chute nette des températures durant l'épisode, avec des températures voisines de 3°C au moment du pic pluviométrique, pour la station située à 2230 mètres. En conséquence, lors de cet épisode, la température critique était légèrement inférieure à 3°C , puisque la limite de la neige était sensiblement plus haute (2350 mètres).

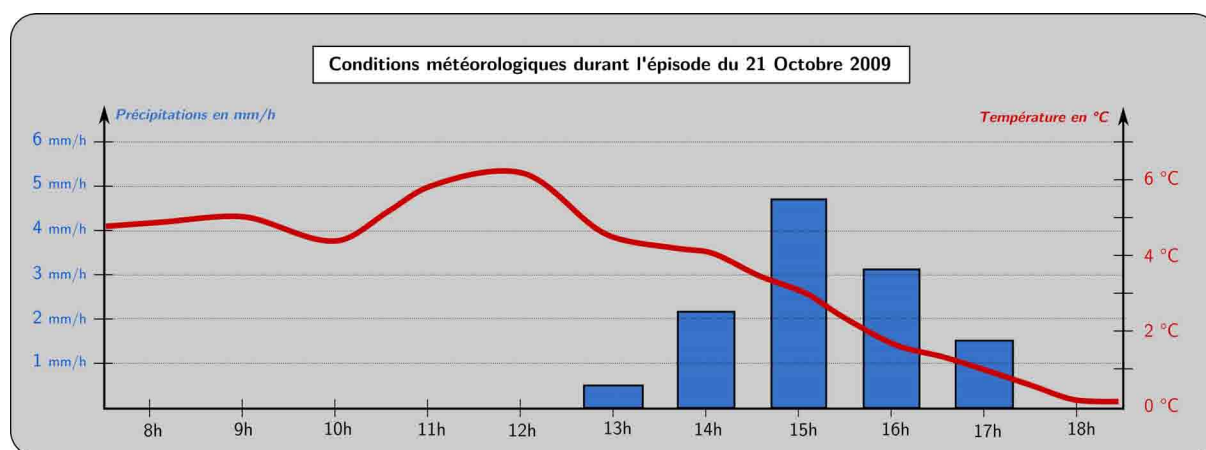


FIG. 13.8: Conditions météorologiques à la station du Lac Blanc durant l'épisode

13.2.2 Détection de l'altitude de fonte :

A la suite d'un épisode neigeux, on observe à certaines occasions un comportement très spécifique du manteau qui tend à diminuer en fonction de la vitesse de fonte et donc de l'intensité de l'ensoleillement et des températures. Afin de suivre au mieux ce recul neigeux, de le quantifier, en vue d'utiliser ces données pour de futurs événements, il peut être intéressant d'analyser les séries d'images succédant à des épisodes neigeux, notamment en calculant les limites altitudinales de fonte.

13.2.2.1 Evolution nivologique du 1^{er} au 7 octobre 2010 :

Dans notre cas, nous allons prendre l'exemple d'une semaine complète mettant en évidence un recul net de l'altitude de l'enneigement, mais également des vitesses de recul observables sur les photographies. L'ensemble des images a été pris durant la première semaine d'octobre 2010 (cf figure 13.9).

L'ensemble de ces images montre un recul progressif du manteau neigeux au cours de la semaine, avec des vitesses locales spécifiques. L'objectif de l'analyse des images est de déterminer la vitesse à laquelle se produit ce retrait.

CHAPITRE 13. CONTRAINTES DES MODÈLES NIVOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES :

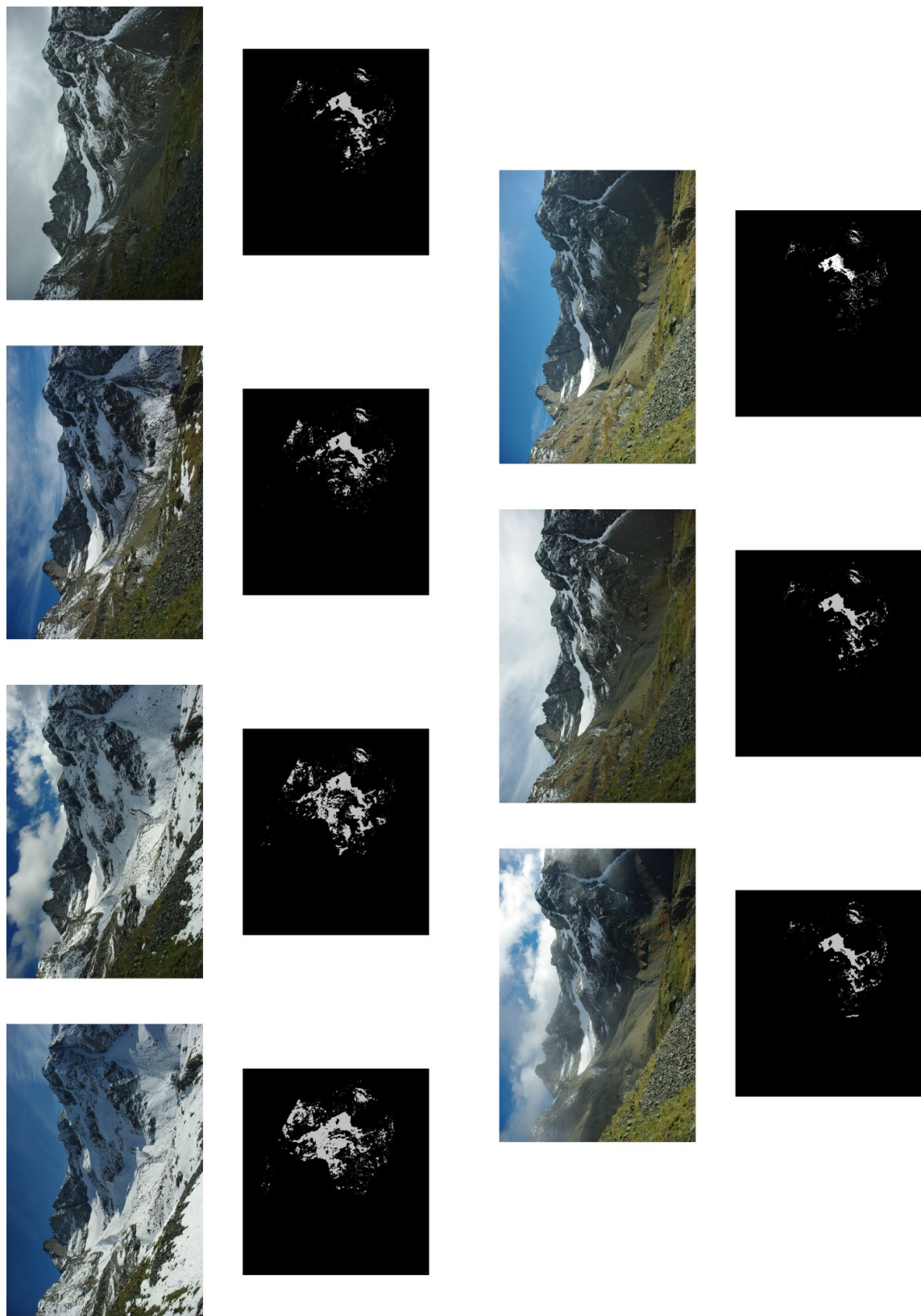


FIG. 13.9: Photographies et cartographies de la semaine du 1^{er} au 7 Octobre 2009 succédant l'épisode neigeux

13.2. UTILISATION D'IMAGES PONCTUELLES SNODEC :

13.2.2.2 Estimation de l'altitude de fonte :

Comme dans l'exemple précédent, on utilise les cartographies créées par le système SnoDEC pour calculer la répartition spatiale de la couverture neigeuse. Les résultats de l'évolution de cette couverture spatiale sont présentés dans la figure 13.10. Dans un premier temps, la couverture diminue fortement dans les parties basses du bassin, et cela pour deux raisons. D'une part, l'épaisseur de neige aux altitudes les plus basses est plus faible et fond donc plus rapidement. D'autre part, dans les parties hautes, même si une fonte se produit, elle est inobservable par le capteur car on ne mesure que la variation de surface du manteau neigeux, et pas ses variations de hauteur. Il peut donc se produire des fontes importantes ne menant pas à des variations spatiales conséquentes. Dans les premiers jours, la couverture diminue donc rapidement, et commence à atteindre un palier. A la fin de la semaine, la situation est revenue lentement à son état initial, avec uniquement la présence du glacier sur les images.

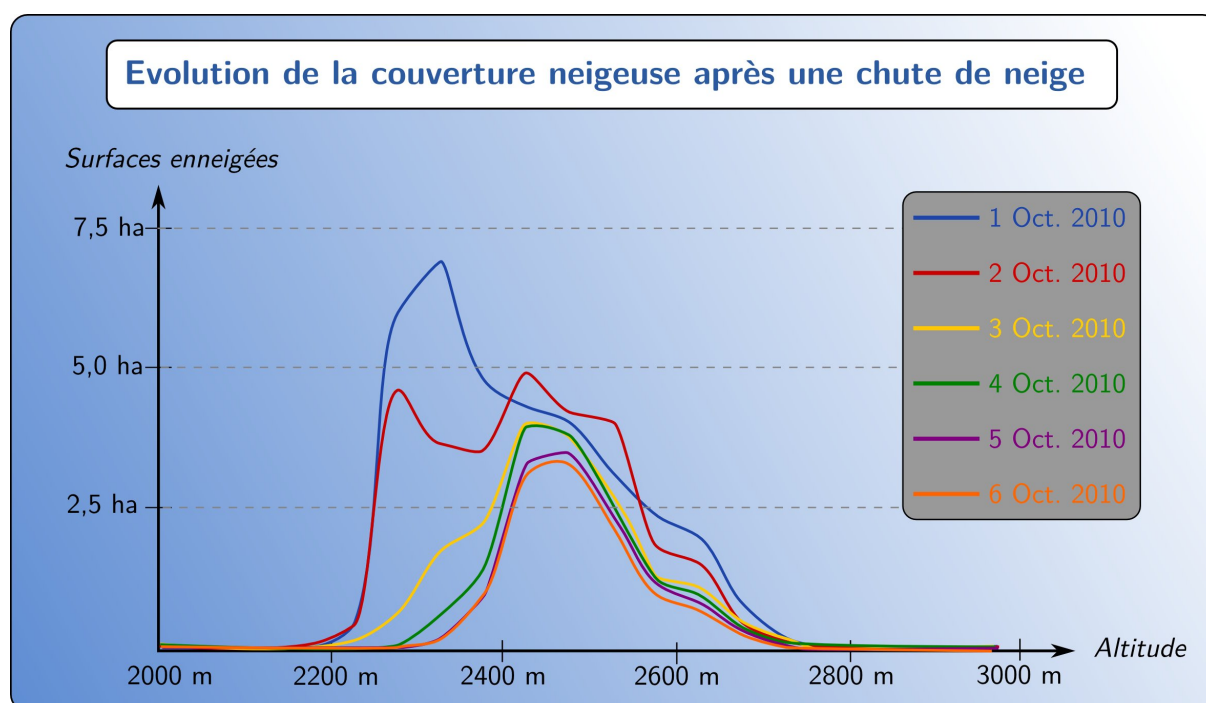


FIG. 13.10: Evolution de la couverture neigeuse au cours de la semaine succédant un épisode neigeux automnal

La figure 13.11 montre l'évolution de l'altitude où la limite entre surfaces enneigées et non enneigées est observée. Cette limite (courbe bleue sur le graphe) n'est calculée que pour les 3 derniers jours en raison des incertitudes générées par le phénomène décrit précédemment (fonte sur la hauteur et pas de variation de la surface). Ainsi, lors des 3 derniers jours, on mesure une élévation continue de l'altitude de fonte. Malgré tout, cette estimation reste limitée puisque une fonte peut se produire à des altitudes plus fortes mais ne pas être observée (uniquement diminution de la profondeur de la neige mais pas de disparition détectable). En conséquence, il est possible d'estimer sur les images une altitude a-minima de la fonte du manteau neigeux qui dans ces exemples passe progressivement de 2400 à 2700 mètres d'altitude en 3 jours. L'ensemble de ces informations pourra être utilisé lors de la simulation des stocks de neige, et notamment, dans le cadre du calcul du facteur de fonte sur le versant, qui pourra dans ce cas être validé sur certains épisodes types.

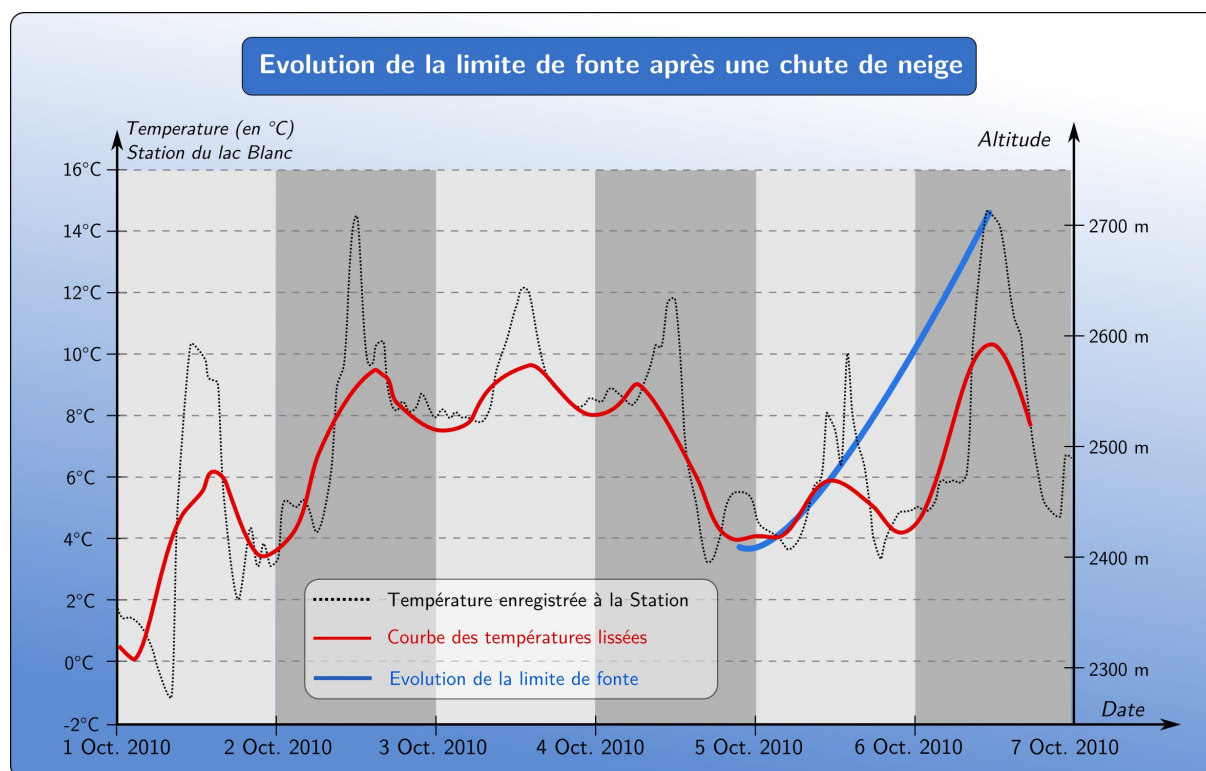


FIG. 13.11: Enregistrement des températures et évolution de la limite de fonte au cours de la semaine succédant à l'épisode neigeux

13.2.2.3 Estimation de l'isotherme 0°C :

Dans le graphique précédent, on a vu que la limite entre zones enneigées et non-enneigées variait au cours de la semaine. A partir des stations météorologiques, il est possible de croiser ces informations avec les températures. Dans notre exemple, on observe des températures relativement faibles à la fin de l'épisode neigeux, et, celles-ci augmentent rapidement quand il prend fin. Lors des trois dernières journées, les températures à la station sont voisines de 4 à 8°C, or, elle est située à 2230 mètres d'altitude. Compte tenu des gradients que l'on a déjà calculé dans la partie précédente (gradient moyen environ égal à $0,4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), on peut donc dire que l'isotherme 0 se situe bien plus haut que la limite du versant dans la phase finale de fonte. En revanche, durant les premières heures succédant l'évènement, la fonte se produit dans une situation où la température est proche de 0°C, voir inférieure. En conséquence, l'insolation semble jouer un rôle essentiel dans les premières heures succédant l'évènement. Autrement dit, cet exemple nous permet de mettre en évidence le fait que les champs de températures peuvent nous aider à modéliser l'évolution du stock de neige, mais dans certains cas, ils doivent être complétés par l'analyse des enregistrements des pyranomètres (enregistrant ici des pics d'insolation) par exemple, afin de prendre en compte le rôle essentiel et difficilement quantifiable avec une simple modèle degrés/jour de l'insolation.

Utilisation des cartes d'enneigement :

Le système SnoDEC présenté dans la seconde partie de ce manuscrit nous permet de mettre en place une base de données conséquente de la cartographie de l'enneigement sur le bassin versant. L'ensemble de ces cartographies peut être analysé de manière spatiale, afin d'en dégager des informations qualitatives sur les modalités de fonte du manteau neigeux, en particulier en fonction de l'altitude et de l'exposition. En outre, on peut dans un second temps essayer d'utiliser ces informations pour quantifier de manière plus précise des vitesses d'ablation en fonction de différents paramètres.

13.3.1 Analyse qualitative du comportement du couvert nival :

Dans cet exemple, nous allons utiliser les données du site du Lac Blanc pour voir de quelle manière se comporte le manteau neigeux en fonction de l'altitude, puis de l'exposition. Cette analyse rapide nous permettra de dégager les grandes tendances qui pourront être utilisées lors des phases de modélisations pour une meilleure prise en compte de ces disparités.

13.3.1.1 Couverture nivale et altitude :

La figure 13.12 présente l'évolution des surfaces enneigées au cours de l'année en fonction de l'altitude pour le site du Lac Blanc. Nous avons volontairement exclu de cette analyse les zones situées à des altitudes supérieures à 2700 mètres, puisque comme elles sont essentiellement constituées de forte pentes et falaises, l'accumulation de la neige y est peu représentative, avec des vitesses de fonte qui correspondent en réalité plus à des purges des fortes pentes qu'à une véritable fonte due à la chaleur.

CHAPITRE 13. CONTRAINTES DES MODÈLES NIVOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES :

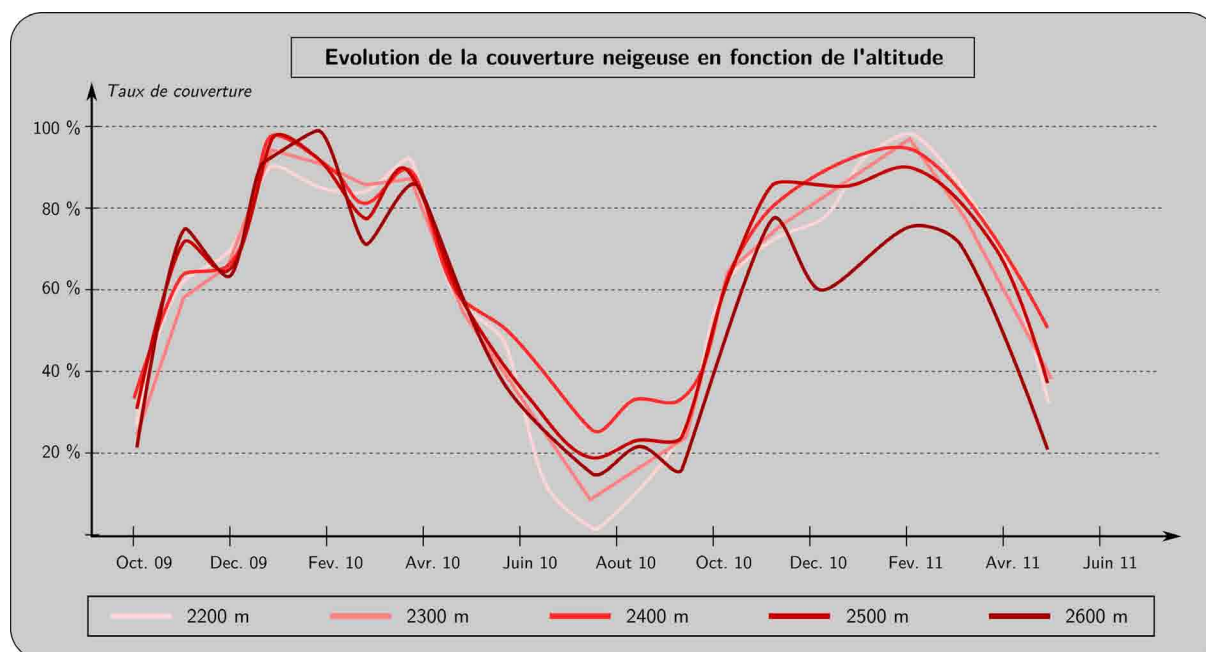


FIG. 13.12: Evolution des surfaces enneigées (en % de surface) en fonction de l'altitude d'après les données SnoDEC du Lac Blanc

La lecture de ce graphe met en avant une décroissance générale du manteau neigeux avec la perte d'altitude comme cela était attendu. Cependant, cette décroissance ne se fait pas de manière linéaire et présente quelques variations au cours de la saison. On remarquera tout d'abord le cas particulier de la zone d'altitude de 2600 mètres, qui présente des couverts neigeux plus faibles et qui est déjà impactée par la présence de fortes pentes. Pour l'ensemble des autres bandes d'altitudes, les vitesses de fonte les plus importantes se situent entre Avril et Juillet, avec des maxima le plus souvent atteint entre mi-mai et mi-juin.

Durant la période estivale, on constate qu'il existe en permanence une couverture nival partielle. En réalité, celle-ci est due aux chutes de neige estivales qui ne manquent pas de se produire et qui font que pour un mois donné, le versant présente toujours une couverture neigeuse ponctuelle. De plus, cette zone est recouverte par un petit glacier qui s'étend de 2400 à près de 2700 mètres, donnant l'apparence d'un couvert nival tout au long de l'année même lorsque l'ensemble de la neige a fondu.

En ce qui concerne la chronologie de la fonte, on a globalement de bonnes correspondances, c'est-à-dire que les zones les plus basses fondent les premières, et ce, pour les deux dernières saisons. Du point de vue qualitatif, on ne met donc pas en évidence un comportement inhabituel du bassin versant au niveau de la fonte. Il convient maintenant de voir si certaines disparités observées dans les modalités de fonte en fonction de l'altitude peuvent être expliquées par des répartitions surfaciques singulières, notamment au niveau des expositions.

13.3.1.2 Couverture nivale et exposition :

Avec l'altitude, l'exposition est certainement le facteur le plus influent sur la fonte du manteau neigeux, en particulier dans le cas de bassins sur lesquels on a de fortes disparités entre deux versants (ici Est-Ouest). La figure 13.13 montre les modalités d'évolution de la couverture neigeuse au niveau de site du Lac Blanc. On rappellera dans ce contexte que malgré le fait que les 4 expositions soient présentées, les orientations préférentielles sont *Nord*

13.3. UTILISATION DES CARTES D'ENNEIGEMENT :

et *Ouest* (70% de la surface environ).

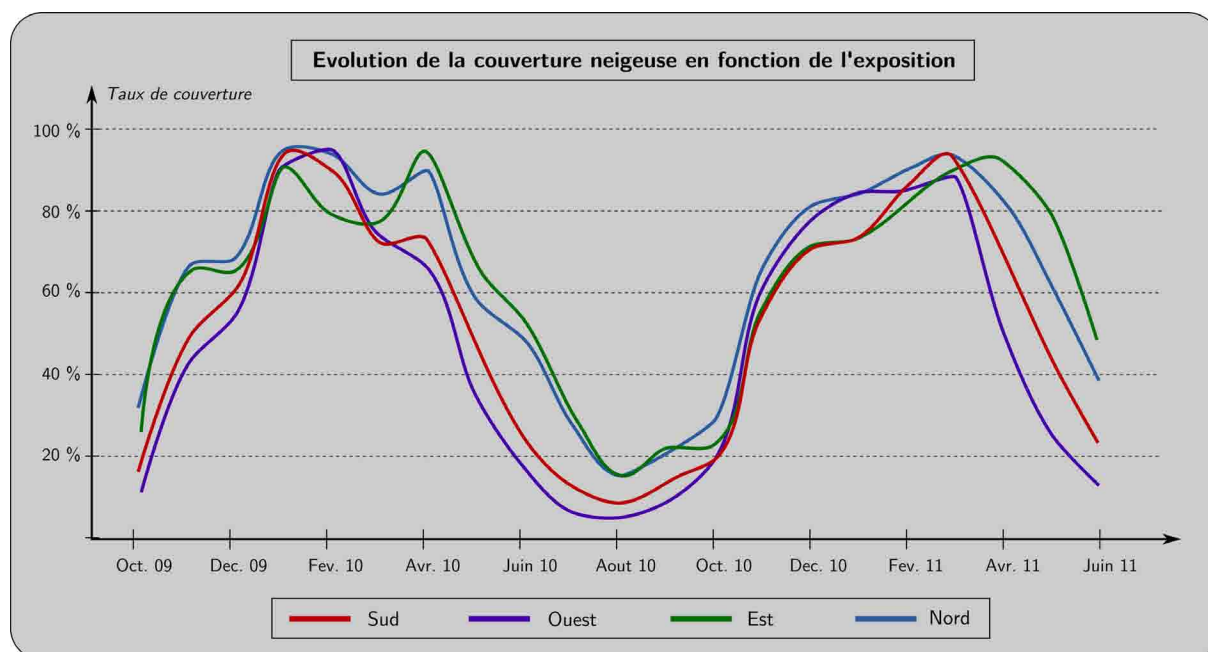


FIG. 13.13: Evolution des surfaces enneigées (en % de surface) en fonction de l'exposition d'après les données SnoDEC du Lac Blanc

Tout comme précédemment, on observe un couvert neigeux tout au long de l'année en raison de la présence du glacier de Freydane sur la partie haute du bassin. Au delà de cette constatation, on remarque une forte différenciation entre les expositions *Nord/Ouest* et *Sud/Est*. Ainsi, les durées d'enneigement sont plus faibles au sud et à l'est avec des vitesses et durées de fonte relativement courtes. Au nord et à l'ouest en revanche la durée d'enneigement est plus importante et la vitesse de fonte est plus modérée. Ce constat met une nouvelle fois en évidence le rôle prépondérant que jouent la course du soleil et la distribution des ombrages sur les versants dans la fonte du manteau neigeux. A ce titre, les écarts mis en évidence entre les différentes expositions semblent être plus importants et plus nets que ceux mis en évidence par l'altitude.

En conséquence, on va observer sur le bassin une forte disparité de l'évolution entre les versants *Nord/Est* et ceux orientés *Sud/Ouest*. En effet, les premiers sont relativement peu exposés au soleil, et, le cas échéant le sont lors des heures matinales qui sont les heures les "moins efficaces" de la journée. En revanche, au sud et à l'ouest le soleil est très présent tout au long des heures les plus chaudes. Au final, on obtient des différences temporelles relativement importantes, de l'ordre du mois en ce qui concerne cette partie du bassin. Il convient également de mettre en évidence le fait que la morphologie du bassin à cet endroit rend une partie des terrains (orientation à l'ouest et nord) particulièrement austère et peu exposée au soleil (Grand Pic de Belledonne créant une zone d'ombre très conséquente une grande partie de l'année), augmentant encore les disparités liées à l'exposition.

Cette rapide analyse quantitative permet de mettre en évidence des différences classiques de disparités de fonte du manteau neigeux. Une étude identique menée sur les données du site du Refuge permet d'obtenir des résultats similaires. En consé-

CHAPITRE 13. CONTRAINTES DES MODÈLES NIVOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES :

quence, certaines informations pourront être utilisées pour valider et contraindre les futurs modèles de fonte, tel que par exemple les délais de déneigement en fonction de l'altitude et de l'exposition que l'on souhaite simuler avec les modèles.

13.3.2 Analyse quantitative du comportement du couvert nival :

Le paragraphe précédent nous a permis de mettre en évidence des différences qualitatives dans les disparités de fonte du manteau neigeux. Or, pour être prises en compte dans les modèles nivologiques, ces disparités doivent être quantifiées plus précisément, notamment dans l'optique de la détermination du facteur de fonte. Ainsi, nous avons essayé de quantifier ces disparités pour mieux les utiliser dans les futurs modèles.

Dans un premier temps, l'ensemble des cartes journalières a été analysé automatiquement, puis, des bilans sur de plus grandes échelles de temps ont permis de créer des tables mensuelles d'évolution des surfaces enneigées. A partir de ces tables, il est possible d'analyser, selon les paramètres d'altitude et d'exposition, les modalités de fonte, et de déterminer leur vitesse relative.

13.3.2.1 Vitesse d'ablation du manteau neigeux et **altitude** :

Le premier travail consiste à analyser nos données selon des zones d'altitudes pertinentes. Au regard de la maille des modèles, des résolutions des cartes, et des phénomènes potentiellement observables à cette échelle de temps, nous avons choisi d'utiliser des bandes de 100 mètres de dénivelée. Pour chaque bande, les différences mensuelles sont analysées et permettent de donner la valeur (en pourcentage d'enneigement) de laquelle la couverture neigeuse a varié. Pour obtenir les vitesses d'ablations moyennes, nous ne retenons que les périodes pour lesquelles nous observons des vitesses de fonte effectives (printemps et début de l'été essentiellement), sans accumulation. Les résultats sont présentés dans le tableau 13.3.

Ce tableau a été obtenu à partir de l'analyse des images des sites du Refuge et du Lac

Altitude	Ablation relative du couvert neigeux (en %/mois de fonte effective)
1600 mètres	-25 %/mois
1700 mètres	-20 %/mois
1800 mètres	-21 %/mois
1900 mètres	-22 %/mois
2000 mètres	-23 %/mois
2100 mètres	-22 %/mois
2200 mètres	-18 %/mois
2300 mètres	-16 %/mois
2400 mètres	-13 %/mois
2500 mètres	-17 %/mois
2600 mètres	-23 %/mois
2700 mètres	-24 %/mois
2800 mètres	-21 %/mois

TAB. 13.3: Taux d'ablation mesurés par analyse des données SnoDEC en fonction de l'altitude sur le bassin du Vorz

Blanc. On obtient donc un bon échantillonnage altitudinal de notre bassin. Dans les zones

13.3. UTILISATION DES CARTES D'ENNEIGEMENT :

supérieures, les valeurs peuvent être affectées par la présence des fortes pentes, tandis que dans les zones inférieures, nous sommes en limite de visibilité et donc nous n'échantillons pas l'ensemble de la bande d'altitude; en conséquence, ces données seront donc à relativiser. Malgré tout, la tendance générale montre une tendance nette à la décroissance des vitesses de fonte avec l'altitude, en passant de 20% de la surface par mois à 15% entre le bas et le haut du bassin. On notera l'exception des 3 dernières valeurs (Grand Pic), et dans une moindre mesure de celles de 1900 à 2100 mètres (falaises du Mousset), qui correspondent à des zones à fortes pentes sujettes comme nous l'avons déjà montré à de fortes incertitudes. On a donc ici des estimations parfaitement utilisables pour comparer les différentes altitudes entre elles, et modéliser leur vitesse d'ablation.

13.3.2.2 Vitesse d'ablation du manteau neigeux et **exposition** :

Un travail similaire a été réalisé pour l'exposition, en prenant cette fois-ci en compte l'orientation des pentes et non pas leur altitude. Après l'analyse des différentes cartographies selon un processus semblable, on obtient les vitesses d'ablation du tableau 13.4.

Exposition	Ablation relative du couvert neigeux (en %/mois de fonte effective)
Nord	-16,6 %/mois
Ouest	-19,4 %/mois
Sud	-18,5 %/mois
Est	-16,4 %/mois

TAB. 13.4: Taux d'ablation mesurés par analyse des données SnoDEC en fonction de l'exposition sur le bassin du Vorz

Ce tableau met clairement en évidence la disparité remarquée dans le paragraphe précédent entre Nord/Est et Sud/Ouest. De plus, la différence des vitesses de fonte est conséquente et atteint 3% par mois, ce qui en terme de fonte peut représenter des différences de couvertures neigeuses de l'ordre de 10 à 20% en fin de période de fonte (Juillet et Août selon les saisons). Une nouvelle fois, ces estimations peuvent être utilisées dans les modèles de fonte.

L'ensemble des données présentées ci-dessus permettent de quantifier l'impact de différents facteurs les uns par rapport aux autres, et, dans l'optique de la détermination du facteur de fonte, elles pourront se révéler extrêmement utiles. De fait, à plus long terme, lorsque nous disposerons d'un facteur de fonte moyen pour un bassin entier, nous pourrions pondérer ce facteur spatialement en fonction de l'altitude et de l'exposition. Une nouvelle fois, nous travaillerons sur des données à haute résolution spatiale et temporelle, puisque dans ces exemples nous avons de larges bandes d'altitude et un pas de temps mensuel, mais, avec notre système, il est possible de descendre à des résolutions beaucoup plus fines (journalier, ~10 mètres).

De plus, de la même manière que pour les températures, nous pourrions travailler de manière relative. En effet, à partir d'un facteur de fonte connu pour une altitude et une exposition données, on pondérera les valeurs sur l'ensemble du bassin versant en fonction des valeurs présentés dans les tableaux exposés précédemment. Ainsi,

CHAPITRE 13. CONTRAINTES DES MODÈLES NIVOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES :

le facteur de fonte pourra être spatialisé sur l'ensemble du bassin. On notera à cette occasion que les contrastes étant les plus forts pour les expositions, l'essentiel de la détermination de la variation du facteur de fonte reposera sur ce paramètre, conformément à ce que les observations nous ont permis de mettre en évidence.

Section 13.4

Première approche du calcul du facteur de fonte :

Au cours de ce chapitre, nous avons vu comment il était possible de connaître ponctuellement et avec une grande précision les dates clefs de mise en place et disparition du manteau neigeux, grâce aux iButtons placés dans le sol. Ensuite, nous avons montré de quelle manière il était possible d'extraire des informations qualitatives et quantitatives des images SnoDEC pour mieux analyser certains événements (chute de neige, fonte). Pour finir, nous avons vu que l'utilisation des cartes d'enneigement permettait de déterminer des différences relatives quantitatives de comportement du manteau neigeux.

Nous allons maintenant présenter une première approche d'un calcul synthétisant l'ensemble de ces données, celui du facteur de fonte. Le facteur de fonte un des éléments les plus importants lors de la phase de modélisation du stock de neige sur un versant ([Eckert, 2002, \[37\]](#) ; [Hock, 2003, \[58\]](#)) et représente une "valeur moyenne" de la vitesse d'ablation du manteau neigeux en fonction de la température. Il est utilisé en particulier par la méthode des degrés/jour, sous forme d'une valeur calée dans le module neige. En réalité, c'est une quantification de l'intensité de la fonte exprimée en $mm/^\circ C/jour$.

En conséquence, il est nécessaire de le connaître convenablement de manière générale, mais également d'estimer son évolution spatiale en fonction des différents facteurs morpho-climatiques que nous avons déjà évoqués.

13.4.1 Méthode de calcul d'un facteur de fonte local :

Le calcul du facteur de fonte ne peut se faire que sur des points où nous disposons à la fois de la mesure des températures, des précipitations et des relevés de présence de neige. Dans ces conditions, nous allons utiliser la station météorologique du Lac Blanc qui se prête particulièrement bien à l'exercice notamment pour la saison 2009-2010 qui est la plus complète et que nous utiliserons ici.

Le principe du calcul est de déterminer la hauteur totale de précipitations, ainsi que les périodes (durées) durant lesquelles on observe la fonte (températures supérieures à $0^\circ C$). En combinant les deux informations, on est capable de calculer la fonte moyenne journalière, et d'en déduire le facteur de fonte saisonnier.

13.4.1.1 Détermination des durées d'enneigement :

Pour déterminer les durées d'enneigement, nous allons combiner les enregistrements de 2 sources distinctes : les iButton-Sol et les images de la caméra du site au niveau de la station. Les données de températures du sol, enregistrées proche de la station (environ 200 mètres) à une altitude et exposition comparable permettent de connaître la durée d'enneigement sur la saison. Pour cette station (Lac Blanc), on obtient une période d'enneigement comprise entre le **30 Novembre 2009** et le **5 Juin 2010**, soit **187 jours d'enneigement**.

A l'aide des images de la caméra SnoDEC sur lesquelles la station est visible, il est aisé de valider ces dates d'enneigement, et, il sera également possible de disposer d'un historique de la hauteur d'enneigement durant l'hiver, pour par exemple essayer d'approcher la valeur de l'équivalent en eau.

CHAPITRE 13. CONTRAINTES DES MODÈLES NIVOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES :

13.4.1.2 Calcul des précipitations neigeuses :

Dans le chapitre 11 sur l'estimation de la pluviométrie, on a vu de quelle manière il était possible d'obtenir une chronique journalière complète des précipitations sur le bassin versant. Nous allons donc utiliser les relations et méthodes développées dans ce chapitre pour estimer les cumuls journaliers à la hauteur de la station du Lac Blanc. Pour l'ensemble de la saison 2009-2010 (de octobre 2009 à octobre 2010), on obtient une valeur de la pluviométrie de 1800 mm. Or, deux informations complémentaires nous permettent de mieux estimer ce cumul.

La période d'enneigement s'étend de début décembre (30 Novembre 2009) à début juin (5 Juin 2010), nous ne retenons donc que les précipitations relevées durant cette période. En effet, les autres précipitations n'ont pas d'impact direct sur le manteau neigeux si celui-ci ne s'est pas encore mis en place ou s'il a déjà fondu.

Les précipitations neigeuses ne se produisent que lorsque les températures sont inférieures ou très proches de 0°C , on va donc pouvoir filtrer l'ensemble des précipitations ne répondant pas à ce critère dans notre base de donnée. Il est bien évident que ce calcul n'est qu'une première approche et sera forcément entaché d'incertitudes, par exemple au niveau de l'impact de la pluie sur le manteau neigeux.

En effectuant l'ensemble de ces opérations, on arrive à un total des précipitations considérées comme neigeuses (équivalent en eau) à la station est de près de **600 mm**.

13.4.1.3 Températures potentielles à la station :

Le second élément principal qui contraint le facteur de fonte est la température régnant au niveau de la station. Pour que la fonte soit observée, on considérera dans un premier temps que la température doit être égale ou supérieure à 0°C . De fait, on va filtrer l'ensemble des températures relevées durant la période de présence du manteau neigeux et calculer la "somme des températures potentielles journalières", ayant régnées durant l'ensemble de la saison. On obtient ainsi 58 jours pour lesquelles les températures ont été positives et pour lesquels on a une fonte potentielle, avec une moyenne de $3,5^{\circ}\text{C}$. Sur l'ensemble de la saison, on a enregistré un potentiel de 200°C positifs ayant eu un impact sur le manteau neigeux.

13.4.1.4 Calcul du facteur de fonte :

On dispose donc de l'ensemble des informations nécessaires pour calculer le facteur de fonte moyen pour l'ensemble de la saison 2009-2010.

$$\text{Fonte journalière} = \frac{600 \text{ mm}}{58 \text{ jours}} = 10 \text{ mm/j}$$

Sur cette saison, le manteau neigeux a fondu de **10 mm/jour** pour les périodes où cela était possible ($T > 0^{\circ}\text{C}$).

En conséquence, rapporté aux températures journalières que l'on a observé, on peut en déduire : $\text{Facteur de fonte} = \frac{10 \text{ mm/j}}{3,5^{\circ}\text{C}} = 2,9 \text{ mm/j/}^{\circ}\text{C}$

Le facteur de fonte journalier moyen est donc estimé à **2,9 mm/jour/degré**.

13.4.2 Spatialisation du facteur de fonte :

Comme cela a été montré dans les parties précédentes, l'altitude et l'exposition jouent un rôle important dans la variation spatiale des températures, mais ces paramètres jouent un rôle encore plus important dans la fonte du manteau neigeux. En effet, la température détermine le potentiel de fonte, et, l'exposition entraîne des variations de l'insolation potentielle arrivant

13.4. PREMIÈRE APPROCHE DU CALCUL DU FACTEUR DE FONTE :

en un point donné. Ainsi, l'exposition et par conséquent la position dans notre versant est un facteur qui conditionne fortement la fonte, avec la contrainte directe de l'ensoleillement potentiel d'un point et donc ses potentialités de fonte. De fait, le facteur de fonte n'est pas constant sur l'ensemble du bassin versant. La partie précédente nous a permis de quantifier ces différences en fonction de l'altitude et de l'exposition, et, nous venons de déterminer le facteur de fonte. En conséquence, il est maintenant envisageable de spatialiser ce facteur.

La spatialisation du facteur de fonte va permettre de mieux représenter les disparités entre les différents versants et les différentes altitudes, permettant ainsi aux modèles de mieux refléter la réalité. Pour cela, on appliquera une pondération au facteur, en fonction des différences morphologiques avec les caractéristiques locales (altitude, exposition,...) du point où il a été calculé. Comme cela a été le cas pour les précipitations, nous allons utiliser les 3 stations de référence et raisonner en terme de station la plus proche pour chaque point de la grille que nous utiliserons.

Dans notre exemple, la station du lac Blanc est située à 2230 mètres avec une exposition Nord-ouest. Il sera possible à partir de celle-ci de calculer les facteurs à différentes altitudes, selon différentes expositions. Pour cela, nous allons pondérer à part égale entre l'altitude et l'exposition et utiliser les rapports entre les vitesses d'ablation que nous avons calculés précédemment, pour mettre en place un ratio. On utilisera de cette façon la relation finale suivante :

$$Facteur\ Fonte_{X,Y} = F_{Station\ Reference} \cdot \left[\left(\frac{V_{expo\ X,Y}}{V_{ref}} \cdot a \right) + \left(\frac{V_{alti\ X,Y}}{V_{ref}} \cdot b \right) \right]$$

Avec : $a + b = 1$ et V les facteurs de fonte selon l'exposition, l'altitude et la station de référence

Ainsi, on aura en chaque point une valeur pour le facteur de fonte qui dépendra de son altitude et de son exposition, dont le ratio sera calculé en selon les différentes vitesses observées sur le bassin. En d'autre terme, il sera possible à plus long terme, à partir du facteur de fonte spatialisé, de différencier des fontes de hautes altitudes moins importantes, de fontes de basses altitudes plus intenses, ou encore, de prendre en compte l'exposition des versants nord protégés de l'ablation contre les versants sud très vite déneigés.

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 13 :

Ce chapitre a permis de mettre en place différentes techniques d'analyses des données hydrométéorologiques disponibles, de les croiser, de les interpréter, et de les utiliser de manière à acquérir de l'information ponctuelle, à haute résolution spatiale et temporelle. L'ensemble des informations qu'il est possible d'extraire des images nous prouve ainsi que le système SnoDEC va au delà de la simple cartographie et peut se révéler très enrichissant pour une étude approfondie de certains paramètres spécifiques du bassin. En outre, la richesse des données météorologiques dont nous disposons nous permet de quantifier certains paramètres que l'on est souvent obligé de calibrer. Nous sommes ainsi capables de déterminer des informations intermédiaires comme par exemple :

- *Dates de début d'accumulation du manteau neigeux (capteurs iButton-Sol)*
- *Dates de fin d'ablation du manteau neigeux et vitesses d'ablation en fonction de l'altitude et de l'exposition (capteurs iButton-Sol)*
- *Détermination de la limite Pluie/Neige (SnoDEC + Températures)*
- *Détection de l'altitude de fonte (SnoDEC + Températures)*
- *Analyses qualitatives des disparités de répartition du manteau neigeux (SnoDEC)*
- *Quantification des variations d'enneigement sur les versants (altitude, exposition,...) (SnoDEC)*
- *Calcul du facteur de fonte (SnoDEC + Températures + Pluviomètres + Totalisateurs)*

L'ensemble de ces informations et données ne peut être obtenu que grâce à la cohérence du système et à la complémentarité des éléments mis en place, qui se révèle finalement tous utiles et efficaces dans ce multi-échantillonnage ponctuel.

En conséquence cette présentation non exhaustive de techniques d'extraction de données permet de disposer d'une nouvelle source d'informations pouvant nous permettre dans le futur d'améliorer les données d'entrées des modèles (facteur de fonte), de mieux les contraindre (disparité d'enneigement, épisodes spécifiques), et de valider leur fonctionnement (cartographie de la couverture neigeuse). La technique d'instrumentation développée sur le Vorz se révèle donc efficace et permet d'envisager de futures modélisations à haute résolution spatiale et temporelle.

13.4. PREMIÈRE APPROCHE DU CALCUL DU FACTEUR DE FONTE :

Chapitre 14:

Conclusions générales et perspectives :

Sommaire du Chapitre:

14.1 Critiques et perspectives d'améliorations du réseau de mesure :.....	337
14.1.1 Suivi de l'hydrométrie :.....	337
14.1.2 Enregistrement de la pluviométrie :.....	338
14.1.3 Mesure des températures :.....	339
14.1.4 Cartographie du manteau neigeux :.....	340
14.1.5 Remarques et conclusions générales sur le réseau de mesure :.....	340
14.2 Vers une nouvelle compréhension des mécanismes hydro-météorologiques :.....	342
14.2.1 Climatologie et météorologie sur le Vorz :.....	342
14.2.2 Hydrologie du bassin versant :.....	343
14.3 Premiers pas vers la modélisation hydrologique du bassin versant du Vorz :.....	346
14.3.1 Météorologie :.....	346
14.3.2 nivologie :.....	346
14.3.3 Hydrologie :.....	348
14.3.4 Calage et fonctionnement du modèle :.....	349
14.3.5 Proposition de structure pour le futur modèle hydrologique	350

Introduction du Chapitre 14 :

L'observation du bassin versant du Vorz durant ces deux dernières saisons nous a permis de collecter une quantité de données conséquente permettant de mieux comprendre le fonctionnement du bassin, d'envisager des modélisations hydrologiques adaptées, ou encore de mieux prendre en compte les variabilités spatiales et temporelles des bassins versants de montagne. Après avoir montré quelques applications potentielles des instrumentations en place, et étudié comment la base de données permettait de modéliser la météorologie sur le bassin versant, il est temps de tirer un premier bilan de ce travail et d'en dégager les principales perspectives. De ce bilan, il se dégage trois grands domaines que nous allons examiner et discuter, pour lesquels des perspectives claires se sont dégagées ou des connaissances particulières ont été acquises.

L'élément principal de ce travail est l'installation du réseau de mesure et son exploitation. Ce chapitre est l'occasion de revenir sur les perspectives de nouveaux développements technologiques possibles pour améliorer le réseau. Il est également intéressant de tirer des conclusions par rapport aux points n'ayant pas donné entière satisfaction, en préconisant quelques recommandations pour les instrumentations futures.

La compréhension des mécanismes hydrologiques était relativement avancée lorsque ce travail a commencé, mais certaines questions restaient en suspens. Ainsi, les observations hydrométriques ont permis de mieux cerner certains types d'évènements (forts débits) et ont mis en lumière des fonctionnements inattendus du bassin versant. Nous reviendrons ici sur les processus que nous pensons avoir mis en évidence au cours de cette étude.

Enfin, à plus long terme, l'objectif est de développer sur le Vorz un modèle hydrologique intégré, dans le but de mieux gérer les problématiques de crues et de gestion des ressources en eau. A l'issue de ce travail, nous commençons à dégager les grandes lignes de la structure de ce futur modèle intégré. Nous allons présenter ici de quelle manière nous envisageons à ce jour de réaliser ces modélisations.

Section 14.1

Critiques et perspectives d'améliorations du réseau de mesure :

Le réseau de mesure mis en place sur le Vorz a constitué le coeur du travail durant cette étude. Il se compose de 4 grands domaines pour lesquels nous allons tirer le bilan des perspectives de développement et des améliorations susceptibles d'en améliorer le fonctionnement.

14.1.1 Suivi de l'hydrométrie :

14.1.1.1 Système IMAGINE :

La caméra IMAGINE placée au niveau de la prise d'eau du Pleyne a mesuré l'hydrologie en continu depuis le mois de Novembre 2008. Les principaux problèmes rencontrés ont été des perturbations sur les enregistrements des images. Plusieurs images ont ainsi été perdues par une défaillance du système au moment de l'écriture des données images dans un fichier. Pour palier à ce problème, probablement lié à l'effet du fonctionnement de la centrale (perturbations électromagnétiques), nous avons réalisé un blindage complet des câbles de transmissions entre la caméra et l'ordinateur. Cette technique a permis de considérablement réduire les pertes.

Dans un second temps, un nouveau logiciel d'acquisition, ainsi qu'un nouvel ordinateur a été installé. Fonctionnant sur une plateforme java, ce logiciel a résolu l'ensemble des problèmes d'acquisition et sécurisé la sauvegarde des données, puisque celle-ci s'effectue à la fois sur le disque dur et sur une carte SD interchangeable. Ce système possède une capacité de plusieurs giga-octets, ce qui donne une autonomie de plus de 4 mois. La mise en place du logiciel d'acquisition a également permis de faciliter le stockage et le tri des données ce qui est un gain de temps considérable dans la gestion de la base de données.

14.1.1.2 Utilisation de l'imagerie :

Les images collectées par le capteur servent pour le moment uniquement à détecter les hauteurs d'eau du torrent du Vorz et en calculer le débit. Mais, nous avons vu tout au long de ce travail qu'il est possible d'extraire toutes sortes d'informations des images. On peut par exemple à moyen terme envisager de détecter sur les images le stade de développement de la végétation (*cf. Chapitre 10*). De même il devrait être possible en observant par exemple des surfaces rocheuses ou "bétonnées" sur l'image de déterminer en fonction de leur couleur si une pluie est observée ou non.

Dans l'immédiat, une application directe secondaire de cette caméra pourrait être de mesurer systématiquement l'évolution de la hauteur de neige au cours de l'hiver. Pour réaliser cette tâche, une simple échelle de mesure pourrait être installée dans le champ de la caméra. La détection de la hauteur de neige pourrait se faire manuellement, et éventuellement automatiquement par analogie avec l'algorithme existant pour les hauteurs d'eau. Au vu de la précision des images, il sera alors possible d'observer des épisodes neigeux avec une bonne résolution temporelle (5 minutes à la caméra du Pleyne), et également d'observer des fontes journalières précises en terme de hauteur, venant compléter les données du système SnoDEC.

14.1. CRITIQUES ET PERSPECTIVES D'AMÉLIORATIONS DU RÉSEAU DE MESURE :

14.1.1.3 Gestion du capteur à distance :

La mise en place de la télétransmission des données du capteur IMAGINE aurait plusieurs avantages directs, comme la sécurisation du processus de stockage, et le contrôle de la continuité du fonctionnement de la mesure. Il semblerait qu'il existe sur le Vorz une possibilité de raccorder la caméra au réseau internet directement depuis le Pleyne, ce qui serait très efficace. Mais, alternativement, on peut imaginer l'utilisation du satellite ou encore la télétransmission radio des données. Des études sont actuellement menées sur ce point.

Outre la garantie d'observer en temps réel le bon fonctionnement du matériel, la télétransmission, permettrait d'adapter le pas de temps de mesure aux conditions hydrométéorologiques. En effet, il n'est probablement pas utile en hiver de disposer d'un image toutes les 5 minutes, tandis qu'en été certains épisodes courts et intenses mériteraient d'être échantillonnés à un pas de temps plus précis (vidéo continue par exemple dans certains cas). L'adaptation du pas de temps de mesure pourrait grâce à la télétransmission se faire en temps réel et permettrait de mieux gérer l'échantillonnage. De plus, ce système permettrait de connaître en temps réel les hauteurs d'eau et de mettre en place un système d'alerte en cas de dépassement de certains seuils. Sans aller jusqu'à l'évacuation des villages. Il serait alors possible de réaliser lors de ces alertes un contrôle "humain" sur le site pour déterminer de la dangerosité de la situation (outil d'aide à la décision).

A plus long terme, on peut imaginer que lorsque le calcul des débits se fera directement sur le site, le système soit autonome, gère le processus d'alerte et adapte le pas de temps d'échantillonnage aux conditions en cours. A ce titre, une liaison en direct avec les pluviomètres (enregistrant un épisode pluvieux ou non) pourrait être une solution envisageable pour gérer ces problèmes.

14.1.2 Enregistrement de la pluviométrie :

14.1.2.1 Pluviomètres :

Du point de vue instrumental, la mesure de la pluviométrie pourrait être considérablement améliorée par l'installation de pluviomètres chauffants. Mais, cela n'est pas envisageable, tout d'abord en raison de la contrainte que nous nous sommes fixé d'instrumenter à faible coût par des équipements légers, mais également en raison de la nécessité d'une alimentation énergétique conséquente de ce type d'appareil, dont nous ne pouvons disposer sur le bassin. Du point de vue de l'échantillonnage, un pluviomètre supplémentaire pourrait être installé en entrée de bassin versant (La Gorge, Pré-Marcel,...) ou encore dans le vallon de la pierre afin d'améliorer la résolution spatiale sur partie sommitale du bassin versant.

14.1.2.2 Totalisateurs :

Les totalisateurs ont relativement bien résisté aux deux saisons passées sur le site, malgré une faiblesse détectée sur un des tubes. Dans l'avenir, il est envisagé de remplacer ces tubes en PVC par des tubes métallique (inox,...) plus résistants aux contraintes hivernales. Le système de fil chauffant a également apporté entière satisfaction, même si le type d'éolienne permettant l'alimentation pourrait être discuté (vertical, horizontal). En effet, l'éolienne du lac Blanc a par deux fois été endommagée ou arrachée du mat sur lequel elle était scellée.

Une idée intéressante serait d'ailleurs d'équiper les fils électriques de l'éolienne d'un logger "léger" permettant d'enregistrer la tension en continu et d'avoir ainsi une idée des périodes de fort vents, susceptibles d'engendrer du transport de neige par exemple. Dans un second temps, un étalonnage en laboratoire permettrait de lier tension enregistrée à la vitesse du vent, conférant à l'éolienne le double rôle de fournisseur d'énergie et de capteur de mesure.

CHAPITRE 14. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES :

La principale et indispensable amélioration à apporter aux totalisateurs est leur résolution temporelle. Pour le moment les mesures sont réalisées ponctuellement et manuellement à des pas de temps assez importants en raison de la difficulté d'accès au site. Il conviendrait donc de trouver une solution permettant de mesurer la hauteur d'eau dans le tube en continu, ou au moins, au pas de temps hebdomadaire (l'idéal étant le pas de temps journalier). Pour cela, on peut envisager la mise en place de différents types de capteurs, soit de pression au fond du tube (difficulté pour la collecte des données), soit à ultra-sons sur le haut du tube, ou encore un appareil photographique (détection de la hauteur). Malgré tout, on se heurte ici au problème de la vocation première du capteur qui se voulait économique et deviendrait beaucoup plus coûteux.

14.1.3 Mesure des températures :

14.1.3.1 Stations de mesure :

La mesure des températures au niveau des stations météorologique nous a donné entière satisfaction. Une suggestion d'amélioration serait comme pour les pluviomètres de rajouter une station dans l'entrée du bassin versant pour améliorer notre calcul de gradient. Cependant, on peut mettre en évidence le fait que les 3 capteurs ne sont pas identiques (2 marques différentes), et que bien qu'ils soient homologués de la même manière, nous avons mis en évidence des différences de fonctionnement notables, en particulier en raison de la position du capteur dans la station (extérieur du collecteur et intérieur). A l'avenir, équiper nos stations de capteurs identiques permettrait une meilleure et plus fiable comparaison entre les stations.

14.1.3.2 Réseau iButton :

Les iButtons nous permettent de calculer le champs de température à haute résolution spatiale et temporelle sur le bassin versant. Leur variabilité spatiale nous permet d'échantillonner un maximum d'altitudes et d'expositions. Les transects transversaux et longitudinaux mettent en évidence la course du soleil et les gradients thermiques. Malgré tous nos efforts en début d'instrumentation pour répartir au mieux ces capteurs, on s'aperçoit aujourd'hui que notre objectif a été considérablement compliqué par la morphologie du bassin versant. Ainsi, l'essentiel de nos capteurs se trouvent dans la zone altitudinale médiane (entre 1200 et 2000 mètres), à des positions relativement proches des "centres" névralgiques du bassin (Pleynet, Mousset, Lac Blanc,...). Avec cette répartition, les parties hautes du bassin (crêtes, vallon de la pierre, de la Sitre,...) sont moins instrumentées, et, nous manquons à cette occasion des données importantes. De plus, compte tenu de leur répartition, les expositions ne sont pas toutes représentées de manière idéale. A contrario, certaines zones semblent sur-échantillonnées au regard des données dont nous disposons aujourd'hui (cirque du pleynet), et, nous pouvons dans certains cas envisager de de-densifier le réseau, en vue de le compléter à d'autres endroits.

A l'avenir, il conviendrait donc de ré-instrumenter certains secteurs du bassin, en privilégiant des orientations plutôt *Sud* et *Est* qui sont sous-représentées dans notre échantillon de stations. Il serait alors possible de déterminer avec plus de précision des gradients d'exposition qui viendraient compléter les gradients altitudinaux et permettraient d'améliorer encore la résolution des cartes de températures. Une analyse identique peut être faite au niveau des iButton-Sol.

14.1. CRITIQUES ET PERSPECTIVES D'AMÉLIORATIONS DU RÉSEAU DE MESURE :

14.1.4 Cartographie du manteau neigeux :

14.1.4.1 Amélioration des caractéristiques du capteur :

Le fonctionnement du capteur SnoDEC ayant été très satisfaisant, les améliorations techniques sont plus de l'ordre de la précision de la mesure que de sa fiabilité. Malgré tout, notre expérience nous incite à recommander pour toute utilisation future du capteur, d'accorder un soin tout particulier à l'emplacement du panneau solaire qui détermine la capacité de l'appareil à fonctionner en hiver. De la même manière il pourrait être intéressant de modifier le "timer" de programmation du système, qui se révèle compliqué à utiliser et programmer dans des conditions de terrain (en falaise, ordinateur indispensable,...).

Avec les progrès des technologies numériques, la résolution des appareils est de plus en plus fine. Nos appareils à 10 millions de pixels nous offrent une résolution finale sur les images allant de quelques centimètres à quelques mètres, mais dans l'avenir, on peut imaginer que cette résolution pourrait être encore plus précise. Cela serait très avantageux pour la précision globale du système, mais également dans l'optique de la détection des hauteurs de neige sur les images.

On a vu que la problématique de la détection de la neige était complexe. Malgré les techniques développées, et les perspectives d'amélioration par un réseau de neurone, cette étape reste une source d'incertitudes non négligeable. Une solution alternative pourrait être la mise en place d'appareils ou de simples filtres infra-rouge qui seraient peut-être en mesure de permettre de mieux distinguer la neige sur les images. En plus de la détection de la neige, les données infra-rouge pourraient également permettre d'envisager de distinguer des évolutions de structures de la neige (neige mouillée, neige sèche,...).

14.1.4.2 Détection des hauteurs de neige :

Parmi toutes les évolutions futures envisageables, le capteur SnoDEC sera probablement à l'avenir développé et amélioré dans le but de mieux détecter les hauteurs de neige à la surface des bassins versants. Cet objectif nécessite un développement de techniques innovantes importantes et ne peut malgré de premiers tests positifs qu'être envisagé à moyen et long terme.

14.1.4.3 Amélioration de l'échantillonnage sur le site du Vorz :

Sur le site du Vorz, notre échantillonnage nous permet de couvrir environ 25% du bassin versant (exutoire du Pleynet), et une gamme d'altitude allant de 1600 mètres à 3000 mètres ce qui représente la quasi totalité de l'étagement possible (1350 à 2977 mètres). Au niveau des expositions couvertes, nous avons globalement la gamme complète des possibilités, même si certaines expositions sont sur-représentées comme le *Nord* et l'*Ouest*, conformément à la morphologie du bassin. Malgré tout, pour certaines expositions et zones hydrologiques, on pourrait envisager une meilleure couverture améliorant notre représentativité spatiale. Ainsi, l'équipement du Vallon de la Pierre au dessus du Refuge Jean-Collet améliorerait considérablement notre échantillonnage des orientations *Sud* et *Est*. Dans ce cadre, on pourrait envisager la pose d'un capteur à la hauteur du Col de la Sitre sur le versant faisant face au vallon de la Pierre. Ce site dispose d'une vue idéale sur le vallon, et bénéficie de plus d'un bon ensoleillement au niveau de la crête ce qui est essentiel pour le bon fonctionnement du capteur.

14.1.5 Remarques et conclusions générales sur le réseau de mesure :

Nous conclurons cette partie par quelques remarques et perspectives générales sur le réseau de mesure, en terme d'amélioration de sa structure et de gestion des données.

CHAPITRE 14. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES :

14.1.5.1 Réseau de mesure en télé-transmission des données :

A l'heure actuelle, la collecte des données sur le réseau se fait de manuellement et ne nous permet pas de contrôler les équipements en temps réel et régulier (hiver,...). De plus, la gestion de la base de donnée peut se révéler délicate, puisque les données n'y accèdent pas en continu, mais par "paquets". Dans ce cadre, il pourrait être intéressant de réfléchir à la mise en oeuvre d'un système de télétransmission des données. De tels systèmes existent (Wifi, GPRS, radio,...), mais nous sommes confrontés à la problématique de l'alimentation en énergie du réseau. Comme nous l'avons mentionné, des études sont en cours sur la problématique de la télé-transmission, et ce procédé pourrait être envisagé à moyen terme. Le grand avantage serait de pouvoir surveiller en continu le bassin versant, et éventuellement de pouvoir gérer la situation en cas d'alerte hydrologique (crue, "sécheresse",...). Dans le même temps, il serait possible grâce à cette technique de contrôler en temps réel le bon fonctionnement du réseau.

14.1.5.2 Problématique de l'échantillonnage :

Au démarrage de cette étude sur le Vorz, nous avons instrumenté de manière conséquente afin de disposer d'un maximum de données pour le futur. Maintenant que les données ont commencé à être exploitées, on remarque que certaines variables sont certainement sur-instrumentées.

La question est donc de déterminer si le nombre de capteurs que nous avons implanté est adapté ou non. Ainsi, des études de sensibilité pourront à l'avenir être abordées afin de déterminer le nombre optimal de capteurs à installer sur le bassin.

De la même manière, la position de certains capteurs n'est peut-être pas judicieuse, et, certaines zones ne sont pas instrumentées. Les études et tests de sensibilité pourraient mettre en avant les zones les plus importantes hydrométéorologiquement, et nous permettre de cerner les zones à instrumenter préférentiellement.

L'ensemble de ces analyses de sensibilité permettra d'améliorer la représentativité spatiale et temporelle du réseau, et d'en rentabiliser au mieux le coût.

14.2. VERS UNE NOUVELLE COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUES :

Section 14.2

Vers une nouvelle compréhension des mécanismes hydro-météorologiques :

L'instrumentation mise en place sur le bassin versant nous permet aujourd'hui de mieux appréhender les mécanismes climatiques, météorologiques et hydrologiques. Toutefois, on se gardera de toute conclusion définitive, le réseau n'ayant que deux années de recul, qui plus est assez spécifique comparées aux moyennens générales (neige précoce, fonte très rapide,...). On rappellera ici quelques tendances que nous avons pu observer sur le versant, et, les nouvelles conceptions que nous avons des écoulements sur le Vorz.

14.2.1 Climatologie et météorologie sur le Vorz :

Sur le plan hydrométéorologique, le bassin versant du Vorz est conforme à nos attentes, avec des spécificités liées aux zones de montagnes.

14.2.1.1 Température :

Sur ces deux dernières saisons, le bassin versant du Vorz a confirmé sa classification en tant que bassin de haute montagne, avec des températures moyennes relativement froides de $0,7^{\circ}\text{C}$ à $3,4^{\circ}\text{C}$. Durant l'hiver, les températures sont descendues régulièrement sous les -10°C avec des pointes à -20°C , et sont en situation de gel (donc de neige potentielle) de 55 à 80% du temps selon les altitudes. En été en revanche, les températures sont assez tempérées, et, même si on observe quelques périodes de fortes chaleurs (25°C), celles-ci ne sont jamais très élevées. Nous sommes donc en présence d'un bassin versant froid.

Ce caractère froid et austère du bassin versant est en grande partie dû à son orientation essentiellement *Nord* et *Ouest*, conjuguée à un fort encaissement au pied des sommets et lignes de crêtes principales du massif, culminant entre 2500 et 3000 mètres. A l'intérieur de ce bassin, les gradients de températures mesurés par les iButtons ne montrent pas des valeurs très fortes, puisque l'on atteint seulement $0,4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Cette valeur traduit une certaine homogénéité des températures, une nouvelle fois due au caractère encaissé du bassin, même si on relève des gradients plus forts au niveau du refuge, ou l'exposition *Est* et *Sud* augmente de manière significative les contrastes thermiques.

14.2.1.2 Pluviométrie :

Au niveau de la pluviométrie, on se situe clairement dans une zone humide (comparée à la vallée du Grésivaudan), avec des cumuls dus en partie à la position en altitude, mais surtout à la position du bassin versant dans la bordure ouest du massif alpin, qui voit l'essentiel des régimes perturbés d'ouest (les plus nombreux) l'atteindre avec une intensité maximale. Sur les 3 stations du bassin versant l'estimation des précipitations annuelles à partir des pluviomètres et totalisateurs donne des valeurs de l'ordre de 1800 à 2000 mm/an suivant la station. Ces forts cumuls sont à replacer dans le contexte général où l'altitude peut jouer un rôle. A l'inverse à ce qui était attendu on a observé un gradient hivernal négatif des précipitations (neigeuses et pluvieuses), avec des maxima enregistrés pour le Pleynet. En été en revanche, on notera l'absence de gradient orographique évident et une certaine similarité dans les cumuls aux différentes stations.

CHAPITRE 14. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES :

En ce qui concerne les précipitations journalière, il s'est avéré impossible de mettre en évidence une relation systématique nette entre les différentes stations du bassin. A l'échelle de l'évènement, les différences entre les stations ne sont pas constantes entre les épisodes et il devient difficile d'estimer la pluie de manière algorithmique. Les cumuls atteignent des valeurs importantes mais pas exceptionnelles sur la période de mesure, avec des maxima de 70mm/j atteint par deux fois, en mai 2011 (Pleynet), et en août 2010 (Lac Blanc). Potentiellement, les cumuls peuvent cependant être bien plus importants, puisqu'on a relevé des intensités de 27,5 mm/h au Pleynet (Juin 2010).

Nous sommes donc sur un bassin versant particulièrement humide, pour lequel la distribution des précipitations, qui bien qu'affectée par l'altitude, est essentiellement liée à la position dans le bassin versant. Ainsi la position en "entrée" de bassin est particulièrement exposée, tandis que dans la partie interne du massif est un peu plus protégée.

14.2.1.3 Nivologie :

La conjugaison des différents facteurs climatiques (versant froid et humide), entraîne une forte propension à observer un couvert nival conséquent et sur une période relativement longue. Les données mesurées par le capteur SnoDEC ont permis de mieux estimer les variations de cette couverture nivale au cours de l'année. On observe ainsi les premières chutes de neige entre la fin du mois d'octobre et le milieu du mois de novembre, en fonction des différentes zones du bassin. L'essentiel du manteau neigeux est constitué dans le courant du mois de février, pour les parties basses pour lesquelles on distingue les premiers signes de fonte dès la fin du mois de mars et le début du mois d'avril. Pour les zones les plus hautes (supérieures à 2000 mètres), l'enneigement est croissant jusqu'au milieu du mois de mai, avec des fontes s'échelonnant de fin avril à la mi-juillet suivant la saison.

Le manteau neigeux aura donc un rôle essentiel dans la compréhension des mécanisme hydrologiques du bassin versant, puisqu'il est présent de 5 à 10 mois par an suivant les secteurs, avec en complément la présence du glacier de Freydane (5% de la surface du bassin versant du Lac Blanc). En conséquence, il faudra en tenir compte lorsque l'on essaiera de comprendre les mécanismes d'évolution des ressources en eau et de génération des crues.

14.2.2 Hydrologie du bassin versant :

L'hydrologie générale du bassin versant est fortement influencée par la présence de la couverture neigeuse. On va ici s'intéresser à deux phénomènes distincts mais pourtant liés : les intensités de crues et forts débits, et le fonctionnement géomorphologique (en particulier le stockage) du versant.

14.2.2.1 caractéristiques des forts débits :

Durant la période *Octobre 2008 / Juin 2011*, aucune crue majeure n'a été observée sur le Vorz. On a cependant observé quelques épisodes de forts débits mais pas uniquement liés à des précipitation intenses.

L'exemple du 26 Août 2009 met en évidence le caractère dangereux du Vorz. En effet, en une vingtaine de minutes, on passe de la situation d'un torrent en étiage à des débits conséquents susceptibles de destabiliser quelques matériaux dans la gorge du Vorz en aval du Pleynet. Cette situation est d'autant plus remarquable que ce jour là, aucune pluie n'est relevée à la station de Chamrousse. Nous ne disposons malheureusement pas à cette époque de l'équipement météorologique qui nous aurait permis de mieux comprendre cet évènement. On notera cependant, que le bassin versant était à ce moment la relativement sec et donc

14.2. VERS UNE NOUVELLE COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUES :

susceptible de stocker une partie des précipitations. En conséquence, l'épisode est probablement lié à des précipitations de hautes altitudes, là où le sol n'est pas capable de stocker l'eau en grande quantité (vallon du Lac Blanc).

En 2010, à la fin de la période de fonte (du 15 au 22 Juin), le torrent du Vorz a présenté une période de forts débits, dont les valeurs étaient comparables à celles de la crue de 2009, mais, durant une durée beaucoup plus longue. Cet épisode fait suite à un hiver neigeux, et surtout un printemps tardif avec des chutes de neige conséquentes jusqu'à la mi-mai. Lorsqu'une nouvelle période pluvieuse s'amorce à la mi-juin, le bassin versant est donc dans une situation d'humidité importante, avec de faibles capacités de stockage, renforcées par la fonte des neiges (températures largement positives). On assiste alors à une période de forts débits qui va durer suffisamment longtemps pour être potentiellement dangereuse en cas de précipitations intenses toujours possibles à cette période de l'année.

Mis à part ces deux épisodes, nous n'avons pas relevé de forts débits importants durant la période de mesure. Malgré tout, les hausses de niveau rapides sont pour l'essentiel observées durant les mois de juillet, août et septembre comme cela avait été montré dans le rapport préliminaire sur le Vorz. Ce qui est d'autant plus remarquable n'est pas le manque de crues et forts débits, ce qui peut arriver si les précipitations ne sont pas intenses ; au contraire, ces épisodes ne sont pas liés aux précipitations maximales que nous avons enregistrées sur le bassin (71 mm/j à deux reprises, 27,5 mm/h) mais sont plutôt le fruit de précipitations moyennes. Il semble donc que les conditions météorologiques ne soient pas suffisantes, mises à part à haute altitude, pour générer à elles seules une crue. Ainsi, pour tenter de cerner le phénomène qui semble permettre le tamponnage de certaines pluies importantes, mais pas d'autres plus raisonnables, nous avons exploré les spécificités géomorphologiques du bassin versant qui sont les seules alternatives possibles.

14.2.2.2 Fonctionnement géomorphologique du versant :

Comme on vient de le dire, de fortes pluies n'ont pas engendré de crues importantes, tandis que des pluies modestes ont entraîné des épisodes de forts débits notables. Dans ces conditions, il est peu évident de trouver une réponse entièrement basée sur les critères météorologiques et hydrologiques, et, nous devons pour cela nous pencher sur la géomorphologie du bassin versant qui est la seule capable de créer ce genre de phénomènes.

Au début de ce travail, nous pensions que le comportement du bassin versant était relativement simple, avec des écoulements hypodermiques extrêmement rapides dans le cirque du Lac Blanc. Ceux-ci se poursuivaient jusqu'au moins en aval du Habert du Mousset, à partir duquel le sol est plus présent (végétation forêt), et permet une infiltration plus conséquente que dans les moraines et pierriers de la partie haute. Force est de constater que dans le cadre de cette théorie, chaque précipitation intense sur le haut du bassin versant conduirait à une augmentation de débit au Pleyne quasi immédiate, ce qui n'est pas le cas. En conséquence, il semble y avoir une zone où le débit est tamponné.

Cet effet tampon pourrait se produire au niveau du Lac Blanc, mais les études menées lors du "Projet Vorz" ont montré qu'il n'était pas suffisamment important pour permettre ce stockage à lui seul. Dans le même temps, on constate que chaque épisode de forts débits observé fait suite à une période pluvieuse, ce qui veut dire que le bassin versant est en situation d'humidité prononcée, et possède donc une capacité de stockage limitée. Il ressort de ces observations que les forts débits semblent liés à une saturation des capacités de stockage du bassin versant et donc pas uniquement à l'intensité de la pluie.

CHAPITRE 14. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES :

Les différentes cartes et observations de terrain à notre disposition montrent qu'il n'est probablement pas possible de stocker de l'eau en quantité importante dans la partie supérieure du bassin versant (zone du Lac Blanc, au dessus des falaises du Mousset). En revanche, le seul endroit susceptible de jouer un rôle tampon et écreteur de crue est le vallon du Mousset. Lorsque l'on observe sa composition, on constate qu'il est essentiellement composé d'éboulis de pieds de pentes et de vestiges de gros éboulements (d'une dizaine de mètres d'épaisseur), qui se prêtent particulièrement bien au stockage d'eau, même lors d'épisodes rapides. Pour chercher à confirmer cette hypothèse, des observations de terrains et de photographies ont montré que la zone d'écoulement située entre le pied des falaises et le ressaut du Boulon présentait sur un linéaire d'environ 500 mètres des capacités d'infiltrations conséquentes. En consultant des images de la zone, on constate que le débit du torrent diminue considérablement entre le pied des cascades et le pont du Mousset. Même s'il reste possible qu'il y ait résurgence de cette eau en aval, le temps de trajet et la capacité de stockage laisse à penser qu'il est probable que le replat du Mousset joue un rôle hydrologique important dans l'écoulement des forts débits sur le bassin versant. En ce qui concerne la partie basse située sous le Pleynet, on se trouve dans des zones de forêts, avec des hauteurs de sol plus importantes, et les écoulements qui s'y produisent de manière hypodermique sont de fait plus limités et contribuent moins que ceux de la partie haute du versant.

Ce phénomène expliquerait donc que l'on observe des forts débits essentiellement lors des périodes humides, pendant lesquelles les capacités de stockages se trouvent limitées. Une solution pour confirmer cette hypothèse plus solidement serait de placer un piezomètre dans cette zone, et de réaliser un suivi du niveau d'eau sur le replat du Mousset. Malgré tout, ce réservoir bien que conséquent reste limité, et, il est probable qu'en cas de très fortes précipitations, il ne puisse jouer un rôle suffisamment important pour empêcher et limiter une crue telle que celle de 2005. Cela expliquerait cependant, la rareté des événements de moyenne et faible amplitude sur le Vorz.

Les spécificités que nous venons de décrire montrent que la géomorphologie doit être prise en compte dans les modélisations hydrologiques, en particulier pour la gestion des ressources en eau, mais également pour la protection contre les crues. Nous allons maintenant présenter quelques recommandations et suggestions qui pourront aider aux futures modélisations intégrées sur le bassin versant.

14.3. PREMIERS PAS VERS LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

Section 14.3

Premiers pas vers la modélisation hydrologique du bassin versant du Vorz :

La modélisation intégrée du bassin versant est la prochaine étape à réaliser sur le Vorz. Pour cela, on devra prendre en compte l'impact potentiel d'un nombre important de paramètres, qui devront aboutir à un modèle physiquement le plus juste possible, mais également fiable. Ainsi, sa conception et sa structuration devront être réfléchies bien en amont et prendre en compte le maximum de données que nous avons présenté dans ce mémoire.

14.3.1 Météorologie :

Les données météorologiques constituent les données d'entrées vitales du modèle. Cela nécessitera au minimum des données pluviométriques journalières pour l'étude des ressources en eau, voir horaire, ou moins pour la simulation des crues. Pour déterminer la typologie des précipitations, un champ de température au pas de temps adapté aux pluies sera nécessaire. Ces sources de données proviennent pour l'essentiel des méthodes présentées dans les chapitre précédents.

14.3.1.1 Pluviométrie :

Les données pluviométriques du bassin versant du Vorz se présentent sous forme de cartographies. On a vu dans le chapitre 11 que ces cartographies étaient réalisées à partir des données des 3 stations pluviométriques, et générées soit au pas de temps horaire, soit journalier. Au niveau méthodologique, on utilisera deux techniques principales, celle des polygones de Thiessen et krigeage, ainsi que la méthode des corrections pluviométriques mise au point durant ce travail.

14.3.1.2 Températures :

Les mécanismes permettant d'obtenir les cartes de températures ont été présentés dans le chapitre 12, et nous permettent d'obtenir des champs de température au pas de temps horaire. Pour cela, on va utiliser le réseau de iButtons présent sur le versant, ainsi que les stations météorologiques, et rechercher des gradients locaux permettant d'estimer les températures sur l'ensemble du bassin versant.

14.3.2 nivologie :

La spécificité de notre bassin versant est la couverture nivale présente une grande partie de l'année. Afin de la prendre en compte, l'intégration au modèle un "module neige" permet de simuler l'évolution des stocks d'eau sous forme de neige sur le bassin versant au cours de la saison, en fonction de la pluviométrie et des températures.

14.3.2.1 Le module Neige :

Le module neige est l'élément essentiel du modèle. En effet, si on modélise bien l'évolution du stock de neige, on connaîtra correctement les lames d'eaux disponibles pour les écoulements (*Nicolle, 2011, [88]*). L'entrée du module neige est conditionnée par la température à la surface

CHAPITRE 14. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES :

du bassin versant. A cette occasion, on raisonnera sur notre grille MNT de référence à 5 mètres de résolution. En chaque point, on connaît la température et les précipitations. On est donc capable de déterminer leur typologie.

a) *Notion de température seuil :*

La typologie des précipitations est conditionnée par la température seuil. Si l'en tient aux définitions physique, cette température est de 0°C (pour l'eau pure). Cependant, dans la réalité elle est également conditionnée par l'humidité ambiante, la nature des précipitations (neige humide, neige sèche, pluie et neige mêlées, grésil,...), et les conditions au sol. En effet, si une neige susceptible de s'accumuler tombe sur un sol non gelé et humide, l'accumulation sera difficile. Au contraire, si une neige humide, qui ne tiendrait pas sur un sol non enneigé, tombe sur un manteau neigeux en place, elle va s'accumuler.

On voit bien l'importance de cette température seuil, mais, malgré tout les effets décrits ci-dessus ne se produisent qu'à son voisinage. Les erreurs seront donc de faibles amplitudes. Si l'on souhaite malgré tout utiliser une température seuil précise, on a vu au chapitre 13, que le système SnoDEC permettait de la déterminer à l'occasion de certains événements. Elle pourrait donc être calculée à partir de données réelles, et non pas à partir d'un calage ou d'une valeur arbitraire.

b) *Facteur de fonte :*

Lorsque la température seuil est calculée, et qu'elle a été comparée à la température ambiante, on peut procéder au calcul de la fonte potentiel. Pour cela, on fera dans un premier temps appel à la méthode des degrés/jours, comme cela est couramment le cas ([Eckert, 2002, \[37\]](#)). Dans notre cas, le facteur de fonte pourra cependant ne pas être déterminé par calage. En effet, on a vu au chapitre 13 qu'il était possible d'estimer de manière précise ce facteur en plusieurs points du bassin. De plus, on peut calculer à partir des cartographies d'enneigement les différences de fontes relatives entre les expositions du bassin versant. Ainsi, le facteur de fonte précis est calculé, puis, il est pondéré à partir des données SnoDEC, selon l'altitude et l'exposition.

c) *Course du soleil et insolation :*

A plus long terme, on peut envisager de complexifier ce "module neige" qui joue un rôle essentiel. Les conclusions des chapitres 12 et 13 mettaient en évidence le fait que l'exposition jouait un rôle (ombre, exposition au soleil) dans le bassin versant. Dans ce contexte, il semble judicieux de calculer ces zones d'ombres ([Hock, 1999, \[57\]](#)), afin de les prendre en compte dans le calcul de la température locale dans un premier temps, mais surtout, dans la fonte potentielle durant les journées ensoleillées. Pour cela, on dispose de tous les outils nécessaires, et notamment le moteur 3D.

Pour calculer les ombrages, il sera nécessaire dans un premier temps de calculer la course du soleil sur le bassin versant. Dans un second temps, le problème se résume à savoir si une zone peut être éclairée ou non. Cela correspond à un problème de calcul de faces cachées, que nous avons résolu à l'occasion du développement du système SnoDEC.

Il est à signaler que nous disposons sur le versant d'un pyranomètre. Cet instrument peut nous permettre en première approche de pondérer les facteurs de fonte en fonction de l'intensité de l'insolation ([Hock, 2003, \[58\]](#)). Des tests pourraient être réalisés sur cette technique à court terme, au vu de la disponibilité des données et de la facilité potentielle d'intégration de la méthode.

14.3. PREMIERS PAS VERS LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

d) Débit de base hivernal :

Sur le Vorz, on observe une période d'étiage, et ce, même lors des grands froids hivernaux durant lesquels le manteau neigeux est conséquent et ne fond théoriquement pas. De fait, l'eau disponible pour les écoulements peut provenir de trois sources principales :

- Les précipitations (peut probable puisque essentiellement sous forme de neige)
- Des résurgences ou "destockages" depuis les aquifères (géomorphologie) ou de zones plus profondes (géologie)
- Une fonte à la base du manteau neigeux

La solution la plus probable est qu'il se produit une fonte à l'interface entre le manteau neigeux et le sol. Cette fonte peut s'expliquer par des phénomènes physiques (échanges thermiques à l'intérieur du manteau neigeux), ou géologiques (chaleur du sol). En effet, le sol, comme l'ont montré les iButton-Sol est rarement gelé durant la période hivernale, et, il est donc susceptible de fournir l'énergie nécessaire à une faible fonte basale. Ce point pourrait être confirmé par l'installation de sondes d'humidité durant l'hiver à cette interface.

Une autre explication à cette chaleur relative du sol est la présence, en particulier en zones de montagne d'un phénomène géologique de flux radiatif. Ainsi, un flux de chaleur est en permanence évacué des zones profondes vers l'extérieur, en transitant par le sol. L'idée est qu'il pourrait expliquer une partie de la fonte basale du manteau neigeux. Diverses études pourraient être menées, en utilisant un flux moyen sur la région péri-alpine par exemple, en calculant la quantité de chaleur susceptible d'être fournie au manteau neigeux, et donc la quantité d'eau susceptible de fondre. En comparant cette valeur aux débits enregistrés au Pleynet on pourrait juger de la crédibilité de cette hypothèse.

L'ensemble de ces étapes va nous permettre de déterminer pour chaque pas de temps la quantité d'eau susceptible d'être stockée ou relâchée par le manteau neigeux. Cette lame d'eau va ainsi venir s'ajouter au débit de base du torrent (*Paquet, 2004, [92]*), et on pourra la prendre en compte dans le modèle hydrologique.

14.3.3 Hydrologie :

Lorsque l'on connaît de la lame d'eau disponible pour les écoulements, il existe plusieurs modèles hydrologiques pouvant nous permettre de spatialiser, router et différer les écoulements sur le versant. Les modèles que nous envisageons d'utiliser sont robustes et utilisés depuis plusieurs années. Ils ne nécessiteront donc pas de modifications essentielles pour leur fonctionnement.

14.3.3.1 Modèles :

Le premier modèle que nous pouvons envisager d'utiliser est le modèle SCS. Il est basé sur le principe de ruissellement de Horton et permet de calculer des écoulements, en particulier sur les bassins versants possédant peu de capacités d'infiltrations et de circulations hypodermiques. Dans notre cas, il se montrerait certainement très efficace dans la partie supérieure du Vorz qui correspond tout à fait à cette configuration. En revanche, il se montrerait probablement moins adapté pour modéliser la partie inférieure, où l'on observe un couvert forestier important et des sols conséquents.

Le second modèle que nous pouvons retenir est le modèle GR4 développé par le Cemagref. Pour sa part, ce modèle considère le bassin versant dans son ensemble, et simule son fonctionnement hydrologique par l'intermédiaire de réservoirs successifs. Le grand avantage est qu'il

CHAPITRE 14. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES :

ne nécessite qu'une lame d'eau unique en entrée pour l'ensemble du bassin, ce qui est notre cas. Ainsi, la spatialisation des écoulements liés à la neige est effectuée par le module neige et l'eau disponible est ensuite gérée par le modèle. Une telle architecture a déjà été testée par le passé et fonctionne de manière satisfaisante ([Barth, 2008, \[7\]](#)). Cette solution même si elle nécessite un calage des paramètres serait probablement la plus rapide à mettre en place.

Le dernier modèle que nous souhaiterions tester sur le Vorz est TopMODEL. Dans sa version de base, la spatialisation est effectuée en fonction des indices topographiques (liés au déficit en eau sur le versant), et ne correspond par forcément à la réalité des écoulements potentiels sur un bassin versant enneigé. Il conviendra donc d'adapter l'architecture du modèle à notre situation particulière. Pour cela, on pourra faire appel à n-TopMODEL qui considère des bassins versants en cascade, ou encore à TopBAND qui a déjà été utilisé pour effectuer ce genre de simulations sur des bassins versants de montagne ([Durot, 1999, \[35\]](#)).

14.3.3.2 Autres paramètres importants à prendre en compte :

Parmi les paramètres importants à prendre en compte, on a vu que le bassin versant était susceptible de stocker de l'eau dans ses aquifères superficiels (géomorphologie), et plus profond (géologie). Ce type de perte doit être pris en compte dans les différents modèles. Pour cela, il peut être mis en place dans le modèle hydrologique un paramètre de stockage qui permet de stocker ou infiltrer une partie de l'eau disponible des écoulements, en la routant de manière temporaire ou définitive par l'intermédiaire de pertes. L'existence d'un tel outils permettrait d'étudier la validité de l'hypothèse posée dans la partie précédente sur le stockage au niveau du Mousset.

Cependant en l'absence de données quantitatives sur l'importance de ce phénomène et du devenir précis de l'eau stockée, on ne pourrait que procéder en introduisant un paramètre qui devrait être calé à l'occasion de ces épisodes de forts débits, ou sur l'ensemble de la période de modélisation.

Même s'il a été mis en évidence que lors des crues son rôle n'est pas majeur, la présence du lac Blanc dans la partie supérieure du bassin pourrait également faire l'objet d'une prise en compte dans le futur modèle.

14.3.4 Calage et fonctionnement du modèle :

Le calage du modèle hydrologique est une étape essentielle pour son fonctionnement. Ce calage peut dans le cas du Vorz être effectué à partir des chroniques de débits du Pleyne, disponibles depuis Novembre 2008. Le calage des paramètres doit être effectué pour chaque pas de temps, et, puisqu'il est probable que l'on travaille sur plusieurs pas de temps différents (crues et gestion des ressources), cette opération devra se faire plusieurs fois. Malgré tout, l'essentiel du module neige peut être "calibré" en calculant les paramètres, et non par un processus d'essais-erreurs.

Grâce aux cartographies d'enneigement, on dispose d'une bonne base de données sur la couverture neigeuse et son évolution. Sachant que le module neige est l'élément essentiel pour simuler le débit des bassins versants de montagne, on peut également utiliser les images Sno-DEC pour le contraindre à chaque pas de temps journalier. On procédera ainsi par essais-erreurs pour caler le plus précisément possible les paramètres du module. Les cartes d'enneigement nous serviront donc de facteur de contrainte pour ces calibrations.

14.3. PREMIERS PAS VERS LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DU VORZ :

Une dernière perspective est d'utiliser pour le calage la méthode de l'inversion des débits ou de "l'optimisation sous contraintes" (Méthode IDEAL). Ces méthodes font actuellement l'objet d'un travail de thèse réalisé par T.Michon au laboratoire EDYTEM. Dans cette perspective, on peut envisager de calibrer l'ensemble du modèle hydrologique sur le bassin au moyen de cette méthode. Celle-ci permettant de simuler les pluies nécessaires pour générer l'écoulement observé, il serait même possible en théorie, de connaître précisément leur répartition spatiale, et donc, de calculer à l'équivalent en eau précis présent dans le manteau neigeux.

14.3.5 Proposition de structure pour le futur modèle hydrologique

Après avoir présenté l'ensemble de ces perspectives modélisatoires, nous sommes en mesure de proposer une architecture possible au modèle hydrologique intégré du Vorz. Nous espérons pouvoir développer ce modèle, de manière à mieux comprendre et anticiper les phénomènes de crues, ainsi que d'améliorer la gestion des ressources en eau sur le bassin versant. Cette structure est présentée dans la figure 14.1.

CHAPITRE 14. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES :

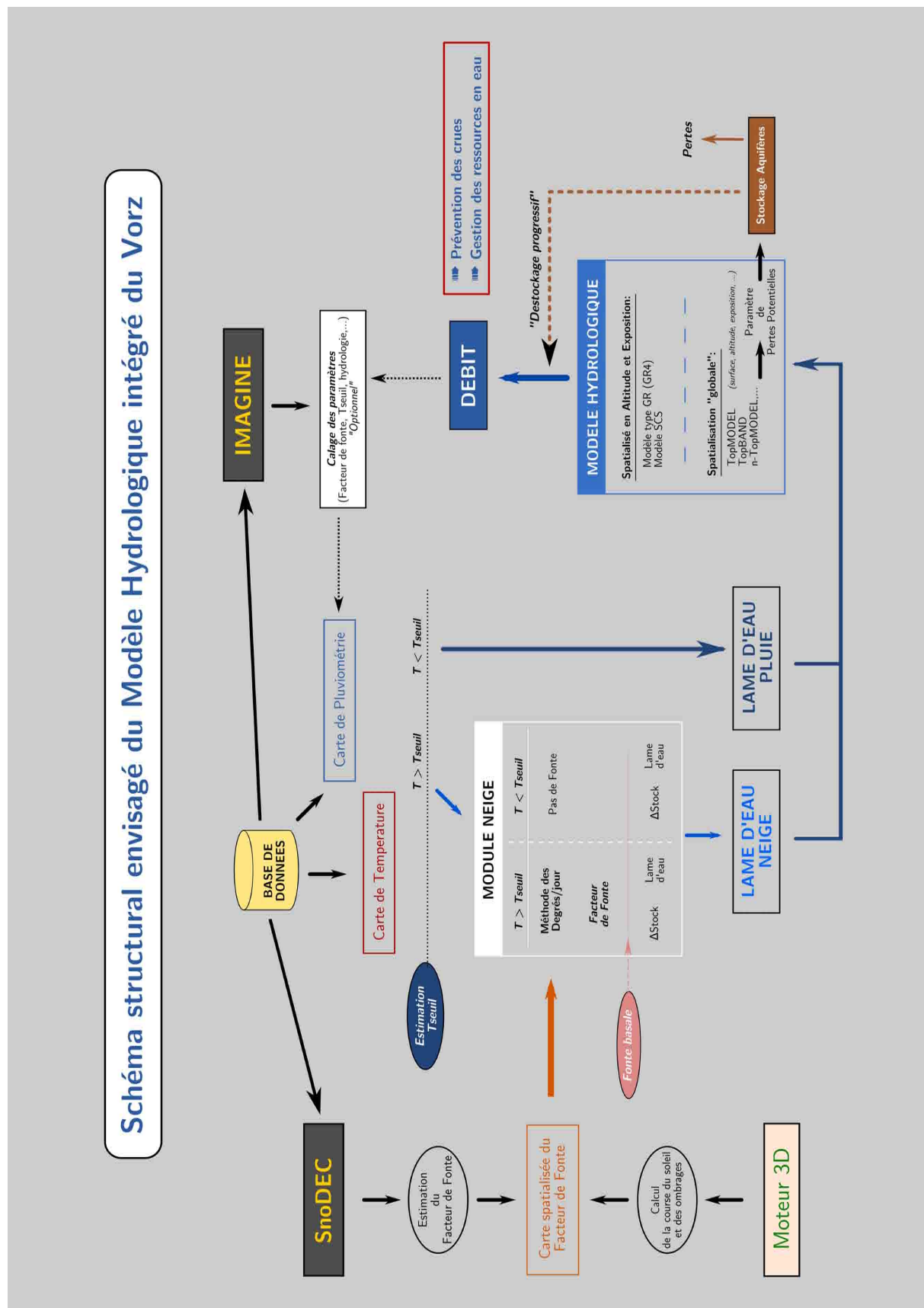


FIG. 14.1: Proposition de structure pour le futur modèle intégré du bassin versant du Vorz

Idées essentielles et Conclusion du Chapitre 14 :

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence les principales conclusions et perspectives de ce travail de thèse. Ces perspectives sont bien entendu à relativiser dans leur dimension temporelle. En effet, une partie d'entre elles constituent des travaux importants et ne peuvent être considérées qu'à long terme (modèle intégré complet, inversion,...)

Concernant l'instrumentation, on a vu que les premiers résultats de ces deux années de mesures ont été concluant et permettront de débiter les modélisations en possession d'une base de données permettant d'envisager des résultats cohérents et pertinents. Néanmoins, quelques améliorations du réseau peuvent être envisagées.

Après 3 années d'études sur le bassin, nous sommes en mesure de considérer la situation avec suffisamment de recul pour constater que certaines de nos première hypothèses n'étaient pas cohérentes avec ce que l'observe sur le bassin. Il ressort ainsi, qu'en certains points, notamment au niveau du Mousset, il existe des capacités de stockages conséquentes qui peuvent influencer sur les débits du torrent pour des épisodes de forts débits d'amplitude moyenne à importante.

La modélisation sera la prochaine étape dans les recherches sur bassin versant du Vorz. Notre expérience nous permet aujourd'hui de construire une première ébauche théorique du modèle hydrologique intégré à mettre en place. A cette occasion, on a pu voir que de nombreux paramètres ordinairement calés ont pu être calculés quantitativement à partir de notre réseau de mesure implémenté sur le Vorz.

Ces perspectives et conclusions viennent mettre en lumière le travail effectué sur le Vorz, d'autant plus que nous disposons aujourd'hui d'une base de données conséquente et disponible à l'utilisation, aussi bien pour la modélisation nivologique que hydrologique. Elles nous permettent de compléter le travail réalisé dans le cadre du "programme Vorz", et de comprendre plus en détails certains phénomènes hydrométéorologiques s'y déroulant.

CONCLUSION

Conclusion

CONCLUSION GENERALE

Tout au long de ce mémoire, nous nous sommes efforcés de montrer comment il est possible d'instrumenter les bassins versants de montagne, de comprendre les processus naturels qui s'y déroulent, moyennant des besoins financiers raisonnables. La réponse à cette problématique a été la mise en place d'un réseau de capteurs ponctuels partiels, à haute résolution spatiale et temporelle, permettant de rendre compte au mieux de l'hétérogénéité et de la variabilité des phénomènes naturels sur le bassin versant du Vorz. Cette thèse a également été l'occasion de développer un capteur de mesure innovant, basé sur l'analyse d'images desquelles on extrait des informations quantitatives sur de nombreux processus relevant de disciplines très différentes.

A l'heure du bilan, il est temps de dresser une liste des recommandations à destination des futurs utilisateurs, qui souhaiterons implémenter ce type de réseau de mesure sur différents bassins versants. Il est également intéressant de dresser un premier constat de sa fiabilité, et de dégager les perspectives qu'il nous a ouvert dans la thématique de l'observation des phénomènes naturels en montagne, ou de la contrainte des modèles appliqués à ces zones.

⇒ Mise en place d'un réseau hydrométéorologique original :

Ce travail a pour socle le constat simple suivant : les processus hydrométéorologiques en montagne sont extrêmement variables en raison de nombreux facteurs (altitude, exposition, morphologie des versants,...), et mieux les appréhender, nécessite une instrumentation cohérente. La contrainte essentielle de l'installation du réseau d'instrumentation a été de disposer et développer un matériel adapté aux conditions des milieux de montagne (froid, humidité, pas de source d'énergie, difficulté d'accès,...). Il a donc fallu utiliser et mettre au point des capteurs robustes, autonomes et fiables. L'objectif final était de développer une méthode transposable aisément à d'autres bassins versants par différents organismes (laboratoires, collectivités, bureaux d'études,...). La contrainte de coût a été un facteur limitant volontaire important, puisque l'ensemble de l'équipement a été réalisé pour moins de 12 000 euros.

Les variables que nous avons instrumentées sur le bassin versant sont les paramètres d'entrées et de sorties essentiels du cycle hydrologique de montagne, à savoir : les précipitations, les températures conditionnant le stockage de neige, l'évolution du manteau neigeux, l'hydrométrie des cours d'eau, l'ensoleillement ou encore la température du sol. Pour chacun de ces paramètres, nous avons réalisé un échantillonnage spatial ponctuel couvrant un maximum de gammes d'altitudes, d'expositions, de conditions morphologiques, permettant ainsi de rendre compte au mieux de l'hétérogénéité locale.

A l'intérieur de ce réseau, la complémentarité des différents capteurs est essentielle. En effet, la plupart des phénomènes ne sont pas observés par un unique instrument, mais plutôt par la combinaison de plusieurs d'entre eux. Ce procédé permet de dégager des informations générales, mais également de fournir des données très précises sur certains processus. La pluviométrie est par exemple mesurée avec plusieurs capteurs (pluviomètres, totalisateurs), de même que les températures (stations, iButton). Cette démarche permet non seulement de conserver de l'information en cas de défaillance d'un capteur, mais également d'extraire des

CONCLUSION

informations annexes ou relevant de processus différents.

Du point de vue de la résolution temporelle, nous sommes confrontés au problème d'échelle de durée des phénomènes. Ainsi certains phénomènes sont très variables temporellement (la pluie), d'autres varient de manière différente selon la résolution de la mesure (températures à l'échelle journalière ou saisonnière), enfin certains évoluent par saccade, à l'image de la neige qui se dépose "ponctuellement" et fond de manière plus lissée. Pour faire face à ces difficultés nous avons choisi d'avoir recours à l'imagerie, qui permet de disposer d'une réelle souplesse d'utilisation tout en étant adaptée au pas de temps de la mesure au regard des phénomènes étudiés.

Le réseau a été installé sur le bassin versant du Vorz à partir de novembre 2008, et est opérationnel depuis octobre 2009. Nous disposons donc de près de deux saisons continues de données.

Le réseau est composé de trois stations météorologiques principales : la station du Pleynet (1350 mètres), la station du Refuge (2030 mètres) et la station du Lac Blanc (2230 mètres), ainsi que de 23 sites de mesures de la température. A cela, il faut ajouter le capteur hydrométrique IMAGINE et le capteur de mesure et cartographie de la couverture neigeuse (SnoDEC). Les processus observés ont été les suivants :

- **Pluviométrie :**
 - 3 pluviomètres classiques (pas de temps : 10 et 15 minutes)
 - 3 totalisateurs (Pluie+Neige) équipés d'un fil chauffant relié à une éolienne empêchant le blocage du tube par la neige.
 - 3 mesures de température au pas de temps horaire par des thermomètres classiques
 - 1 mesure de l'ensoleillement par pyranomètre (Refuge Jean Collet)
- **Température :**
 - 23 sites de mesures de température de l'air par des capteurs de type iButton, entre 900 et 2450 mètres d'altitude, selon un maximum d'expositions (pas de temps horaire).
 - 16 sites de mesures de la température du sol par le même type de capteurs à la hauteur des sites aériens (pas de temps horaire).
- **Nivologie :**
 - 2 capteurs de mesure SnoDEC pour observer l'évolution du manteau neigeux au pas de temps infra-journalier (5 à 7 images/jour) :
 - Refuge Jean-Collet (partie médiane du bassin)
 - Lac Blanc (partie sommitale)
- **Hydrométrie :**
 - 1 capteur IMAGINE pour mesurer les hauteurs et débits du Vorz à l'exutoire du Pleynet (1350 mètres) avec une données toutes les 5 minutes.

Ce réseau a fonctionné de manière satisfaisante tout au long de ses deux saisons d'existence. Il a montré une excellente fiabilité des mesures météorologiques, aussi bien au niveau des stations (100% de réussites), que sur les iButtons-Air (près de 100% de réussite) et la plupart des iButton-Sol (80% du succès). Le capteur IMAGINE a également présenté une fiabilité très élevée (supérieure à 90%). Le système SnoDEC, quant à lui, a fonctionné de manière optimale sur le site du Lac Blanc (100% de réussite) et a présenté quelques "gap" de données au niveau

du Refuge (75% de données enregistrées).

En conséquence, ce réseau nous a permis de quantifier les paramètres hydrométéorologiques essentiels de ce bassin. Cela a conduit à envisager de réaliser des analyses plus précises, à différents pas de temps, pour des variables comme la température, la pluviométrie, ou encore l'évolution de l'enneigement. Ces analyses ont abouti à des cartographies précises des phénomènes hydrométéorologiques sur le bassin versant, et ce, à des pas de temps très fins (journaliers à horaires).

⇒ Développement d'un capteur de mesure innovant :

Le bassin versant du Vorz se caractérise par une couverture nivale conséquente durant 5 à 10 mois de l'année suivant l'altitude. Il était donc essentiel de pouvoir suivre au mieux ses évolutions au cours de l'année, avec un pas de temps adapté (journalier) et une résolution relativement fine (10 mètres), afin de dégager les hétérogénéités spatiales et temporelles existantes. Après avoir étudié les diverses possibilités dont nous disposons en terme de capteurs existants (satellite, aérien, télénivomètres,...), nous avons décidé de développer notre propre capteur de mesure, répondant à ces caractéristiques techniques. Une nouvelle fois, nous avons travaillé en gardant à l'esprit les contraintes liées au milieu de montagne dans lequel nous évoluons, et la limitation des moyens financiers.

Notre volonté de transposer ces techniques à un large champ d'applications, nous a poussé à utiliser de simples appareils photographiques numériques de type réflex comme base du capteur. Ces appareils possèdent de bonnes résolutions (10 millions de pixels), et leur capacité mémoire permet de disposer d'environ 8 mois d'autonomie, soit un hiver complet sur le bassin versant. La protection contre les aléas du milieu (obstruction par la neige, avalanches,...) est obtenue en les fixant en paroi, dans une zone plus protégée (surplomb). Cette protection a été renforcée par un boîtier étanche limitant les agressions de l'eau et du gel, et le protégeant le matériel de l'humidité.

Le problème essentiel était celui de la source d'énergie. L'objectif étant de recueillir de 5 à 7 images par jour, la notion d'autonomie énergétique associée au travail en zone de montagne était prépondérante. Ainsi, les appareils ont été reliés à des batteries dernière génération à haute capacité (lithium-ion), qui peuvent fournir suffisamment d'énergie pour un fonctionnement autonome de plusieurs semaines. Malgré tout, le froid est susceptible d'impacter directement le rendement des batteries, et une source de secours devait être connectée au système. Chaque appareil photographique dispose donc d'un panneau solaire permettant de réalimenter la batterie en permanence, spécialement durant les courtes journées d'hiver.

Le système est donc autonome et peut être laissé à demeure durant plusieurs saisons sur le bassin versant. La préconisation la plus importante lors de l'installation du capteur est de placer le panneau solaire de manière judicieuse, de façon à pouvoir capter le soleil le plus souvent possible pour recharger la batterie. Ainsi les sites ayant de bonnes durées d'ensoleillement pour le panneau solaire (sud, sommet des rochers, crêtes,...) devront être privilégiés.

Pour développer le capteur, nous avons fait face à deux challenges techniques complexes :

- La transformation des images en 2D en cartographie 3D
- La détection automatique des zones enneigées sur les images

Pour réaliser la transformation des images, nous avons implémenté un logiciel de calibration, qui à partir des paramètres de la caméra (angles, position, longueur focale, distorsion) permet

CONCLUSION

de simuler sur un MNT du bassin versant versant la prise de vue de l'appareil photographique. Pour chaque site, une rapide calibration est réalisée et permet à partir des points de contrôle visualisables sur le logiciel, de caler les paramètres. Ces paramètres ont été utilisés pour calculer les transformations géométriques nécessaires pour passer de l'image 2D au monde 3D associé au MNT.

Au cours d'une seule saison, on enregistre près de 4000 images sur chaque site, il est donc indispensable de développer un algorithme permettant de réaliser la détection de la neige de manière automatique. Les conditions météorologiques influent sur la luminosité, et viennent considérablement compliquer cette tâche, notamment avec l'apparition d'images surexposées, présentant de forts contrastes ombre et lumière, ou encore avec la présence de couvertures nuageuses et brouillard. Notre méthode a consisté à développer un utilitaire de création de librairie de codes couleurs RGB caractéristiques des pixels neige. Après calibration par l'utilisateur sur 20 à 30 images présentant des détections difficiles, cette librairie est utilisée pour détecter automatiquement si un pixel est enneigé ou non, par l'intermédiaire de traitements statistiques simples. A l'avenir, cette méthode pourrait évoluer vers l'utilisation d'un réseau de neurones pour effectuer ce travail (*collaboration avec l'Ecole des Mines d'Alès*).

A la suite de ces deux étapes, il a été possible de dresser pour chaque pas de temps la cartographie du manteau neigeux sur le site d'étude. Il existe deux sites d'étude sur le Vorz : celui du Lac Blanc (2250 mètres qui couvre près de 5km^2) dans la partie haute du versant (de 3000 à 2000 mètres), et, celui du Refuge (1950 mètres couvrant 4km^2) dans la partie médiane (entre 2500 à 1600 mètres). Ces deux sites nous ont permis de couvrir environ 25% de la surface totale du bassin, avec une résolution spatiale relativement fine comprise entre quelques centimètres (points proches) et 2 mètres (sommets éloignés), et, une résolution temporelle infra-journalière (5 à 7 images par jour) ; le but étant de posséder au moins une mesure exploitable par jour.

L'analyse des cartographies d'enneigement montre une très forte variabilité spatiale sur le bassin, en particulier en relation avec l'altitude et l'exposition. Dans la partie basse, l'enneigement s'étend en moyenne de décembre à avril, tandis que dans la partie haute, il occupe une place prépondérante de novembre à juin/juillet. Les différences entre les expositions, et plus spécifiquement les orientations nord et sud peuvent d'être importantes, et, pour une même altitude, on peut assister à des décalages de fonte de l'ordre de 2 à 3 semaines. Ces informations qualitatives pourront grâce à la précision des cartes être quantifiées de manière plus précise.

Au cours des deux années d'enregistrement, les capteurs ont montré des taux de fiabilité très satisfaisants, en particulier au niveau du Lac Blanc où des taux de réussites sont de 100% (7 images par jours sur toute la période). Au niveau du Refuge, l'orientation du panneau solaire et la limitation du stockage de l'énergie dans les batteries ont conduit à des pertes relatives (la fiabilité n'est que de 75%). Malgré tout, ces pertes ont eu lieu essentiellement durant la période hivernale (février et mars) et cela n'a pas empêché de collecter des données sur les disparités de fonte au printemps.

La qualité de la détection automatique de la neige est essentielle pour le bon fonctionnement du capteur. Des analyses poussées ont été réalisées sur les deux sites de mesure. Après avoir calibré manuellement près de 300 images, les différences avec les détections automatiques ont été calculées. Dans le cas de l'échantillon de calibration initial (bibliothèque de 20-30 images), les résultats sont concluants à plus de 80%, tandis que dans le cas de l'échantillon de validation, les performances du système atteignent plus de 73% de détections correctes. Le capteur présente donc un bon taux de réussite dans la détection des surfaces enneigées.

CONCLUSION

La précision de la cartographie sur le terrain montre également de bon résultats, malgré des incertitudes liées à la calibration 2D/3D. En effet, les erreurs sont inférieures à 10 mètres pour 2 kilomètres pour le Lac Blanc, et, 50 mètres pour 2 kilomètres au Refuge. La précision de la position sur la cartographie est inférieure à 5%, sachant que ces valeurs sont des maxima trouvés sur les parties les plus éloignées de l'appareil.

En conclusion, le système SnoDEC (Système Nivologique Opérationnel de Détection de l'Enneigement en Continu) s'est montré parfaitement opérationnel et a rempli les différentes attentes d'échantillonnage spatial et temporel. Il est ainsi possible d'observer et de quantifier les phénomènes liés à l'évolution de l'enneigement sur les bassins versants de montagne en continu. De plus, ce système nous a permis d'acquérir des données autres que celle liées aux surfaces enneigées. En effet, on a également pu mesurer ponctuellement des hauteurs de neige, analyser les mouvements et dynamiques glaciaire (Glacier de Freydane) en quantifiant des déplacements, observer le type de temps présent sur le bassin, ou encore, l'évolution du cycle végétatif au cours de la saison.

L'ensemble de ces caractéristiques font de ce capteur un véritable outil interdisciplinaire dans l'étude des zones de montagne, aux résolutions spatiales et temporelles difficilement atteignables par d'autres moyens de mesure.

⇒ Contribution à la modélisation de l'hydrométéorologie en montagne :

Le réseau d'instrumentation du Vorz et les capteurs qui y ont été développés, avaient pour objectifs de : comprendre les phénomènes naturels et processus hydrométéorologiques se déroulant sur le bassin versant, et acquérir une base de données conséquente que l'on va pouvoir utiliser pour modéliser par la suite ces phénomènes. Les paramètres les plus importants tels que la pluviométrie, la température ou la neige, vont donc pouvoir être quantifiés à partir du réseau. Compte tenu de la résolution temporelle de celui-ci, les informations permettront de travailler à différentes échelles de temps, des plus fines (horaires) aux plus générales (saisonnières), avec des résolutions spatiales de l'ordre de la dizaine de mètres, ce qui correspond à la plupart des mailles utilisées dans les modèles hydrométéorologiques.

La pluviométrie est un des paramètres météorologiques les plus variables en montagne, aussi bien spatialement que temporellement. A l'aide des trois stations et totalisateurs, nous avons dans un premier temps mis en évidence des tendances saisonnières qui montrent un gradient orographique négatif en hiver, et une absence de gradient significatif durant la période estivale. En revanche, à l'échelle de l'épisode, aucune tendance nette n'a pu être mise en évidence, et, on ressent plutôt l'impact de la position dans le bassin versant que de l'altitude. En conséquence, il devient difficile à partir d'une relation simple d'interpoler des précipitations sur l'ensemble de la surface du bassin. De plus, les manques de données dus à la présence de pluviomètres non-chauffants nous contraignent à apporter une station externe au réseau. Ainsi, la station de Chamrousse est venue compléter nos données pendant l'hiver, après avoir été corrigée par un coefficient, et avoir vérifié la cohérence des données par rapport aux stations du Vorz (85% des valeurs estimées avec moins de 5mm/jour d'erreur).

Pour générer les cartes pluviométriques, nous disposons d'une base de données au pas de temps horaire, et, avons mis au point deux méthodes d'interpolations des pluies. Ces méthodes reposent sur les techniques suivantes et permettent de réaliser rapidement ces cartes en minimisant les erreurs :

CONCLUSION

- Méthode des polygones de Thiessen dans laquelle les précipitations locales sont déterminées en fonction de la station la plus proche (verticalement et horizontalement)
- Méthode des corrections pluviométriques pour laquelle on détermine la tendance orographique entre les stations au pas de temps souhaité

L'ensemble de ces travaux a permis d'obtenir des cartes au pas de temps horaire, et ce, tout au long de l'année sans aucune interruption durant l'hiver. Il sera ainsi possible de disposer des données d'entrée pour les différents modèles nivologiques et hydrologiques.

Pour générer les cartes de températures, nous avons à notre disposition une base de données conséquente issue des iButtons placés dans l'air, et des stations météorologiques. Dans un premier temps, on a pu estimer le gradient thermique général sur le bassin versant à $0,4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, puis il a été analysé plus en profondeur, avec des calculs de tendance au pas de temps mensuel (effets saisonniers) et horaire (course du soleil).

Dans un second temps, l'objectif était d'implémenter des méthodes rapides et efficaces pour interpoler les températures sur l'ensemble du bassin versant. Afin de rendre compte au mieux de son hétérogénéité, les différences entre les iButtons sont tout d'abord estimées, puis, elles permettent de travailler de manière relative entre les différentes stations. Nous avons ainsi développé deux méthodes différentes :

- Interpolations locales à partir de gradients généraux (horaires, et mensuels) depuis les station météorologiques
- Méthodes des gradients, pour laquelle on calcule les gradients entre les différents iButtons de manière relative en fonction de l'altitude. Dans une seconde phase, ces gradients sont interpolés à partir des 3 stations de mesures sur l'ensemble du bassin.

La validité et l'efficacité de ces méthodes a été par la suite testée, notamment en tentant de reproduire des phénomènes particuliers et difficilement simulables avec de simples méthodes de gradients généraux, tels que les inversions thermiques. Grâce à ces méthodes efficaces, nous obtenons des cartes de température au pas de temps horaire qui conjuguées à celle des précipitations ont permis d'alimenter les différents modèles de stockage de neige et de simulation du manteau neigeux.

Le système SnoDEC et l'ensemble des capteurs de mesures présent sur l'ensemble du bassin versant permettent l'acquisition d'une base de donnée conséquente. Comme on l'a dit, cette base de donnée permet de générer des cartes précises (températures précipitation, couverture neigeuse), destinées aux entrées des modèles, mais également à leur contrainte. Cependant, la grande force de notre réseau d'instrumentation est de combiner les données de différents capteurs pour acquérir des données ponctuelles sur d'autres phénomènes, améliorant notre connaissance des processus hydrométéorologiques du bassin versant. Bien souvent, des informations essentielles sont innaccessibles dans les bases de données, mais, notamment grâce à l'imagerie, ce manque a pu être comblé.

De fait, plusieurs nouvelles données peuvent être ajoutées à notre base : les dates de début et fin de fonte (iButton-Sol), la détermination de la limite pluie/neige et l'altitude de fonte (SnoDEC + pluviomètres), la quantification des variations d'enneigement sur les versants, la hauteur de neige, ou encore le facteur de fonte. L'ensemble de ces données permettra à l'avenir de mieux contraindre les modèles qui représentent le fonctionnement général du bassin versant. On peut ainsi considérer le réseau complet comme la variable d'entrée de notre système de modélisation intégré, puisqu'il permet à la fois de l'alimenter en données, d'en valider les sorties, mais également de le contraindre et le corriger spatialement et temporellement le cas

échéant.

L'objectif de ce travail était de développer et de disposer d'approches instrumentales et modélisatoires originales pour l'hydrométéorologie des bassins versants de montagne. Dans ce cadre, la mise en place de notre réseau d'échantillonnage partiel ponctuel à haute résolution spatiale et temporelle est une réponse efficace aux attentes des différents acteurs de la thématique, notamment en raison de la transférabilité de ses concepts et techniques d'instrumentations à coûts limités. Au delà d'un simple réseau de collecte de données, ses différents composants fonctionnent comme une entité indissociable. Cette spécificité permet par analyse et combinaison des données, d'obtenir des informations ponctuelles menant à une meilleure compréhension des processus du système, et potentiellement de les utiliser pour contraindre les modèles hydrométéorologiques.

Le développement de capteurs originaux a été un moteur essentiel dans le fonctionnement dynamique du réseau, et a débouché sur la création du capteur SnoDEC utilisant l'imagerie en continu en milieu de montagne. Cette particularité permet d'extraire des images des informations non spécifiques au monde de l'hydrométéorologie comme l'observation du cycle végétatif ou encore la dynamique glaciaire. Ainsi, le réseau développé s'inscrit dans une dynamique d'interdisciplinarité et d'ouverture, vers l'ensemble de la communauté scientifique travaillant sur la thématique de la montagne.

A l'origine, la volonté de travailler sur la modélisation de l'hydrométéorologie en montagne était le cœur du développement du réseau. Aujourd'hui, après trois ans de travail, ce réseau se revendique plutôt comme un système d'outils intégrés d'observation de la montagne à haute résolution, destiné aux nombreux acteurs du vaste champ disciplinaire des thématiques de la recherche et de l'étude de ce milieu.

Bibliographie

- [1] Allignol.F. Etude intégrée du bassin versant du vorz consécutive à la crue des 22 et 23 août 2005. Technical report, Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, CNRS, 2008.
- [2] Apel.H, Hung.N-N, Thoss.H, and Gantner.A. Gps inland water buoys for precise and high temporal resolution water level and movement monitoring. In *EGU General Assembly - Vienna*, 2009.
- [3] Arnaud.F. *Signature climatique et anthropique dans les sédiments Holocène des Lacs du Bourget et d'Anserne (Nord-Ouest des Alpes). Paleohydrologie et contamination au plomb*. PhD thesis, Université des Sciences et Techniques de Lille 1, 2003.
- [4] Bales.R-C, Molotch.N-P, Painter.T-H, Derringer.M-D, Rice.R, and Dozier.J. Mountain hydrology of the western united states. *Water Ressources Research*, vol.42, 2006.
- [5] Barfety.J-C, Bordet.P, Carme.F, Meloux, and Montjuvent.G. *Carte géologique de Vizille, 1/50 000, num-797*. BRGM, 1972.
- [6] Barfety.J-C, Menot.R-P, Gidon.M, and Fourneaux.J-C. *Carte géologique de Domène, 1/50 000, num-773*. BRGM, 2000.
- [7] Barth.T. Modélisation hydrologique des bassins versants de montagne. Master's thesis, Université Paris-Est, Marne-la-Vallée, Institut de la Montagne, 2008.
- [8] Barth.T, Saulnier.G-M, and Malet.E. Snow covers detection using terrestrial photography. application to a mountain catchment in alps region (france). In *EGU General Assembly - Vienna*, 2010.
- [9] Barth.T, Saulnier.G-M, and Malet.E. Instrumentation hydro-météorologique d'un bassin versant de montagne. l'exemple du vorz (belledonne). In *Colloque SHF - L'Eau en Montagne, Mieux observer pour mieux prévoir (Mars 2011, Lyon)*, 2011.
- [10] Beniston.M. August 2005 intense rainfall event in switzerland : Not necessarily an analog for strong convective events in a greenhouse climate. *Geophysical Research Letters*, vol.33, 2006.
- [11] Goyette.S Beniston.M ; Keller.F. Snow pack in the swiss alps under changing climatic conditions : an empirical approach for climate impacts studies. *Theorical and applied Climatology*, vol.74 :p19–31, 2003.
- [12] Benniston.M. Warm winter spells in the swiss alps : Strong heat waves in a cold season ? a study focusing on climate observations at the saentis high mountain site. *Geophysical Research Letters*, vol.32 :5p, 2005.
- [13] Varhola.A Bewley.D, Alila.Y. Variability of snow water equivalent and snow energetics across a large catchment subject to mountain pine beetle infestation and rapid salvage logging. *Journal of Hydrology*, vol.388 :464–479, 2010.
- [14] Blöschl.G. Scaling issues in snow hydrology. *Hydrological Processes*, vol.13 :p2149–2175, 1999.

BIBLIOGRAPHIE

- [15] Bonnefoy.C, Quenol.H, Barbeau.G, and Madelin.M. Analyse climatique à l'échelle des coteaux du layon. In *VIII International terroir congress*, 2010.
- [16] Milner.A-M Brown.L-E, Hannah.D-M. Hydroclimatological influences on water column and streambed thermal dynamics in an alpine river system. *Journal of Hydrology*, 325 :p1–20, 2005.
- [17] B.Schäppi, P.Molnar, and P.Burlando. Precipitation gradients along hillslopes estimated from rain gauge transects. In *EGU General Assembly 2011 - Vienna*, 2011.
- [18] Laroche.R Chassagneux.P. Les évènement naturels dommageables en france et dans le monde en 2005. Technical report, Ministère de l'écologie et du développement durable, 2006.
- [19] Christiansen.H-H. Snow-cover depth, distribution and duration data from northeast greenland obtained by continuous automatic digital photography. *Annals of Glaciology*, vol.32 :p102–108, 2001.
- [20] Cingolani.A-M, Renison.D, Zak.M-R, and Cabido.M-R. Mapping vegetation in a heterogeneous mountain rangeland using landsat data : an alternative method to define and classify land-cover units. *Remote Sensing of Environment*, vol.92 :p.84–97, 2004.
- [21] Mandel.F Civate.M. La mesure de la hauteur des précipitations. Technical report, Météo France, Ecole Nationale de Météorologie, 2008.
- [22] Mandel.F Civate.M. La mesure de la température. Technical report, Météo France, Ecole Nationale de Météorologie, 2008.
- [23] Dozier.J Cline.W-C, Bales.R-C. Estimating the spatial distribution of snow in mountain basins using remote sensing and energy balance modeling. *Water Ressources Research*, vol.34 :p1275–1285, 1998.
- [24] Cojean.R, Cabane.N, Fleurisson.J-A, Koscielny.M, Laugier.P, Le Mignon.G, Pollet.N, and Thevenin.I. Torrent hazard assessment and risk mitigation tools, final scientific report. Technical report, Final Scientific Report THARMIT project, 1999.
- [25] Corripio.J-G. *Modelling the energy balance of high altitude glacierised basins in the Central Andes*. PhD thesis, University of Edinburgh, 2002.
- [26] Corripio.J-G. Snow surface albedo estimation using terrestrial photography. *International Journal of Remote Sensing*, vo.25 :p5705–5729, 2004.
- [27] Corripio.J-G, Durand.Y, Guyomarc'h.G, Mérindol.L, Lecorps.D, and Puglièse.P. Land-based remote sensing of snow for the validation of a snow transport model. *Cold Regions science and technology*, vol.39 :p93–104, 2004.
- [28] Cremonese.A, Diotri.F, Morra Di Cella.U, Pogliotti.P, and Galvagno.M. Modelling snow water equivalent distribution in aosta valley (nw italy). In *Colloque SHF - L'Eau en Montagne, Mieux observer pour mieux prévoir (Mars 2011, Lyon)*, 2011.
- [29] Delannoy.J-J. Livre blanc du climat en savoie. Technical report, Conseil Général de Savoie, 2010.
- [30] Condom.T Deroin.J-P. Retrait séculaire des glacial. *C.R.Geosciences*, vol.339 :p.449–459, 2007.
- [31] Djerboua.A. *Prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les alpes franco-italiennes. Prévision quantitative des pluie journalières par la méthode des analogues*. PhD thesis, INPG Grenoble, 2001.
- [32] Dozier.J. Spectral signature of alpine snow cover from the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, vol.28 :p9–22, 1989.
- [33] Dumont.M. *Détermination de l'albedo des surfaces enneigées par télédétection. Application à la reconstruction du bilan de masse du glacier de Saint Sorlin*. PhD thesis, Université Paris-Est, 2010.
- [34] Dumont.M, Arnaud.Y, Six.D, and Corripio.J-G. Retrieval of glacier surface albedo using terrestrial photography. *La Houille Blanche*, vol.2 :p.102–108, 2009.
- [35] Durot.K. *Modélisation hydrologique distribuée du bassin versant nivo-pluvial de Sarenes. Validation des données d'entrée et développement d'un module de fonte nivale sous forêt*. PhD thesis, INPG Grenoble, 1999.
- [36] Nikolopoulos. E-I, Anagnostou.E-N, Borga.M, Vivoni.E-R, and Papadopoulos.A. Sensitivity of a mountain basin flash flood to initial soil moisture and rainfall variability. In *EGU General Assembly 2010, Vienna (Austria)*, 2010.
- [37] Eckert.N. Prise en compte des couverts neigeux temporaires au sein d'un modèle pluie débit. Master's thesis, Université Pierre et Marie Curie et Paris Sud, Ecole des Mines, ENGREF et CEMAGREF, 2002.

BIBLIOGRAPHIE

- [38] Eckert.N. *Couplage données historiques - Modélisations numériques pour la prédétermination des avalanches : une approche bayésienne*. PhD thesis, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech), 2007.
- [39] Farinotti.D, Magnusson.J, Huss.M, and Bauder.A. Accumulation distribution inferred from time-lapse photography and simple modelling. *Hydrological Processes*, vol.24 :p.087–2097, 2010.
- [40] Farmer.C-J-Q, Nelson.T-A, Wulder.M-A, and Derksen.C. Identification of snow cover regimes through spatial and temporal clustering of satellite microwave brightness temperatures. *Remote Sensing of Environment*, vol.114 :199–210, 2010.
- [41] Fily.M, Royer.A, Göita.K, and Prigent.C. A simple retrieval method for land surface temperature and fraction of water surface determination from satellite microwave brightness temperatures in sub-arctic areas. *Remote Sensing of Environment*, vol.85 :p.328–338, 2002.
- [42] Fourquet.G. *Développement d'un système hydrométrique par analyse d'images numériques. Evaluation d'une année de fonctionnement continu sur l'Isère à Saint-Martin d'Hères*. PhD thesis, INPG Grenoble, 2005.
- [43] Gao.Y, Xie.H, Yao.T, and Xue.C. Integrated assessment on multi-temporal and multi-sensor combinations for reducing cloud obscuration of modis snow cover products of the pacific northwest usa. *Remote Sensing of Environment*, vol.114 :p1662–1675, 2010.
- [44] Habib.T Gay.M. Remote sensing for automatic glacial lake detection and surveillance. validated spectral angle mapper algorithm. In *Eurisys conference - September 2005*, 2005.
- [45] Gerbaux.M. *Reconstruction du bilan de masse des glaciers alpins et impact d'un changement climatique*. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 2005.
- [46] Giguët-Covex.C. *Contribution des sédiments laminés lacustres à l'étude des changements environnementaux Holocène. Approche couplée sédimentologique/géochimique à haute résolution. Application à deux lacs nord-alpins*. PhD thesis, Université de Savoie, 2010.
- [47] Gottardi.F. *Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement, Application aux grands massifs montagneux français*. PhD thesis, INPG Grenoble, 2009.
- [48] Graff.B. *Prédétermination des débits de crues des petits bassins versants torrentiels*. PhD thesis, Cemagref Aix-en-Provence, 2004.
- [49] Villemain.P Granada.F, Marco.O. utilisation des techniques d'imagerie pour la cartographie des vitesses à la surface d'une avalanche dense. *La Houille Blanche*, vol.5-6 :p.69–75, 1995.
- [50] Ormaux.S Griselin.M, Nageleisen.S. La photographie oblique terrestre pour une veille environnementale en milieu arctique (webcam du zeppelin fjellet, 79n, spitsberg). In *Septimes rencontres de ThoQuant, Besançon*, 2005.
- [51] Nachtnebel.H-P Haberl.U. Using landsat 7 thermal infrared information as softdata to improve temperature index modelling in alpine catchment. In *EGU Leonardo 2010, Looking at catchments in Colors, Luxembourg, November 2010*, 2010.
- [52] Hanich.L, Duchemin.B, Maisongrande.P, Chaponnière.A, Boulet.G, and Chehbouni.G. Application de la télédétection à la cartographie de l'enneigement du haut atlas de marrakech à partir d'images spot vegetation et landsat tm. In *IMPETUS Conference Ouarzazate, Morocco 2004*, 2004.
- [53] Hauet.A. Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par large-scale particle image velocimetry. *La Houille Blanche*, vol.1 :p80–85, 2009.
- [54] Hauet.A, Kruger.A, Krajewski.W-F, Bradley.A, Muste.M, Creutin.J-D, and Wilson.M. Experimental system for real-time discharger estimation using an image-based method. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol.13-2 :p105–110, 2007.
- [55] Hinkler.J. *From digital cameras to large-scale sea-ice dynamics. A snow-ecosystem perspective*. PhD thesis, University of Copenhagen, Institute of Geography and National Environmental Research Institute (NERI). Department of Arctic Environment, 2005.
- [56] Hinkler.J, Hansen.B-U, Tamstorf.M-P, and Pedersen.S-B. Snow-vegetation relations in a high arctic ecosystem : Inter-annual variability inferred from new monitoring and modeling concepts. *Remote Sensing of Environment*, vol.105 :p237–247, 2006.

BIBLIOGRAPHIE

- [57] Hock.R. A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology*, vol.45 :num.149, 1999.
- [58] Hock.R. Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, vol.282 :p.104–115, 2003.
- [59] Kummenacher.B Hoelzle.M, Wegmann.M. Miniature temperature dataloggers for mapping and monitoring of permafrost in high mountain areas : First experience from the swiss alps. *Pemafrost and periglacial processes*, 10 :p.113–124, 1999.
- [60] Hohenegger.C, Walser.A, Langhans.W, and Schar.C. Cloud-resolving ensemble simulations of the august 2005 alpine flood. *Quarterly journal of the royal meteorological Society*, vol.134 :p889–904, 2008.
- [61] Horaud.R and Monga.O. *Vision par ordinateur : Outils fondamentaux*. 1999.
- [62] Hubbart.J, Link.T, Campbell.C, and Cobos.D. Evaluation of a low-cost temperature measurement system for environmental applications. *Hydrological Processes*, 19 :p1517–1523, 2005.
- [63] Jol.A Isoard.S. Vulnerability to climate change and adaptation to water scarcity in the european alps regional case studies. Technical report, EEA (European Environment Agency), 2009.
- [64] Jobard.S. Retour d'expérience sur l'instrumentation du glacier du baounet, quels apports pour la traçabilité des mesures environnementales ? *Cahiers de Géographies, Collection EDYTEM*, vol.8 :p157–162, 2009.
- [65] Kaar.A, Wessels.R, Haerberli.C-H, Kargel.J-S, and Khalsa.S-J-S. Rapid aster imaging facilitates timely assessment of glacier hazards and disasters. *EOS, American Geophysical Union*, vol.84 :p.117–124, 2003.
- [66] K. Kajuutti, T. Pitkanen, J T. Geist, P Heiskanen, and Pellikka. Comparison of terrestrial photographs and laser scanner in production of digital elevation models for glaciers. In *EGS-AGU-EUG Joint Assembly, 6-11 April 2003, Nice, France*, 2003.
- [67] Kargel.J. Aster imaging and analysis of glacier hazards. *Remote sensing and Digital Image Processing*, vol.11-4 :p.325–373, 2011.
- [68] Kieffer-Weisse.A. *Etude des précipitations exceptionnelles de pas de temps courts en relief accidenté (Alpes Françaises), méthode de cartographie des précipitations extrêmes*. PhD thesis, INPG Grenoble, 1998.
- [69] Koscielny.M. *Impact des aménagements en montagne sur l'évolution géodynamique des versants, application au site des Arcs (Savoie, France)*. PhD thesis, Université de Marne-la-Vallée, 2006.
- [70] Isaksson.E König.M, Winther.J-G. Measuring snow and glacier ice properties from satellite. *Reviews of Geophysics*, vol.39 :p.1–27, 2001.
- [71] Choudhury.B-J Lakshmi.V, Wood.E-F. Evaluation of special sensor microwave/imager satellite data for regional soil moisture estimation over the red river basin. *American Meteorological Society Journal*, vol.36 :p.1309–1328, 1997.
- [72] Lautenschlager.M, Keuler.K, Wunram.C, Keup-Thiel.E, Schubert.M, Will.A, Rockel.B, and Boehm.U. Climate simulation with clm, climate of the 20th century, data stream 3 : European region mpi-m/mad. *EURAC*, 2008.
- [73] Levin.N, Shmida.A, Levanoni.O, Tamari.H, and Kark.S. Predicting mountain plant richness and rarity from space using satellite-derived vegetation indices. *Diversity and distributions*, vol.13-6 :p.692–703, 2007.
- [74] Loot.F Lundquist.J-D. Using inexpensive temperature sensor to monitor the duration and heterogeneity of snow-covered areas. *Water Ressources Research*, 44, 2008.
- [75] Marco.O. *Instrumentation d'un site avalancheux : De l'utilisation des propriétés acoustiques de la neige et des techniques d'imagerie pour la mesure de paramètres physiques d'une avalanche dense*. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 1995.
- [76] Martin.E. Modélisation du manteau neigeux et applications dans les domaines du changement climatique et de l'hydrologie. Technical report, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2005.
- [77] Martin.E, Lejeune.Y, Leblois.E, and Valla.F. Modélisation hydrologique du bassin de sarennes. In *Journées de Glaciologie, Grenoble, Mars 1998*, 1998.

BIBLIOGRAPHIE

- [78] Martini.A, Dedieu.J-P, Ferro-Famil.L, and Potier.E. Apport des données rso polarimétriques multi-fréquentielles et multi-temporelles pour la cartographie de la neige sèche en environnement de haute montagne (alpes françaises). *Téledétection*, vol.6 :p45–55, 2006.
- [79] Matheussen.B-V. *Effects of anthropogenic activities on snow distribution, and melt in an urban environment*. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2004.
- [80] M.Bavay, T.Grünewald, J.Magnusson, and M.Lehning. Modeling the climate change impact on snow and runoff in the alpine space. In *EGU General Assembly 2011, Vienna*, 2011.
- [81] Meriaux.P, Westrelin.S, Cheze.J-L, Tabary.P, Javelle.P, and Defrance.D. Projet rythme : Déploiement d'un réseau de radars dédié la gestion des risques hydrométéorologiques en territoires montagneux méditerranéens. In *Colloque SHF - L'Eau en Montagne, Mieux observer pour mieux prévoir (Mars 2011, Lyon)*, 2011.
- [82] De Meriel.P. L'observatoire du mont-blanc, l'oeuvre de mr vallot. *La Nature*, pages p279–282, 1897.
- [83] Royer.A Mialon.A, Fily.M. Seasonal snow cover extent from microwave remote sensing data : Comparison with existing ground and satellite based measurements. In *EARSeL eProceedings 4*, 2005.
- [84] Michaux.J-L. *Etude, compréhension et modélisation des phénomènes liés au transport de la neige par le vent*. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 2003.
- [85] Margulis.S-A Molotch.N-P. Estimating the distribution of snow water equivalent using remotely sensed snow cover data and a spatially distributed snowmelt model ; a multi-resolution, multi-sensor comparison. *Advances in Water Resources*, vol.31 :p1503–1514, 2008.
- [86] Friedt.J-M Moreau.L. Etude des photos prises par intervalle, glacier ilulissat, gröenland ouest. In *Alpine Glaciology Meeting, section glaciologie, Chamonix*, 2008.
- [87] Naaïm-Bouvet.F. *Contribution à la modélisation physique et numérique du transport de la neige par le vent*. PhD thesis, Université Joseph Fourier Grenoble I, 1997.
- [88] Nicolle.P, Ramos.M-H, Andreassian.V, and Valéry.A. Mieux prévoir les crues nivales : Evaluation de prévisions probabilistes de débit sur des bassins versants de montagne français. In *Colloque SHF - L'Eau en Montagne, Mieux observer pour mieux prévoir (Mars 2011, Lyon)*, 2011.
- [89] OCCC. Les changements climatiques et la suisse en 2050. Technical report, OCCC, 2007.
- [90] OCDE. Changements climatiques dans les alpes européennes, adapter le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels. Technical report, OCDE, 2007.
- [91] OFEV. Changements climatiques en suisse. Technical report, OFEV, 2007.
- [92] Paquet.E. Evolution du modèle hydrologique mordor : modélisation du stock nival à différentes altitudes. *La Houille Blanche*, num.2 (mars avril 2004) :pp. 75–82, 2004.
- [93] Laval.M-T Paquet.E. Retour d'expérience et perspectives d'exploitation des nivomètres à rayonnement cosmique d'edf. *La Houille Blanche*, Vol.2 :p113–119, 2006.
- [94] Nadeau.D-F Parlange.M-B. Field experiments to study the atmosphere over steep alpine environment. In *Colloque SHF - L'Eau en Montagne, Mieux observer pour mieux prévoir (Mars 2011, Lyon)*, 2011.
- [95] Paul.F, Käb.A, Maisch.M, Kellenberger.T, and Haeberli.W. Rapid disintegration of alpine glaciers observed with satellite data. *Geophysical Research Letters*, vol.31, 2004.
- [96] Pedrana.M-G, Garbellini.L, Mallia.L, and Macchiavelli.A. Climate change and tourism. climaltour, a european project looking for the future. Technical report, IREALP - Alpine Space, 2010.
- [97] Petillot.I, Vasile.G, Trouvé.E, Bolon.P, Gay.M, Koehl.M, and Julea.A. Rectification radar de données géoréférencées : application à l'analyse de données dans les régions de haute montagne. In *ORASIS, France (2007)*, 2007.
- [98] Hart.A-B Petley.D-N, Crick.W-D-O. The use of satellite imagery in landslide studies in high mountain areas. In *Proceedings of the Asian conference on remote sensing, 2002*, 2002.
- [99] Q.Weng. Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and gis. *Journal of Environmental Management*, vol.28 :p737–748, 2001.
- [100] R.Böhm, I.Auer, W.Schöner, M.Ganekind, C.Gruber, A.Jurkovic, A.Orlik, and M.Ungersböck. Eine neue website mit instrumentellen qualitätsklimadaten für den grossraum alpen zurück bis 1760. Technical report, Projet HISTALP, 2009.

BIBLIOGRAPHIE

- [101] al. Renard.B. Détection et prose en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en france. In *16eme Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement* - Avignon, 2008.
- [102] Barth.T Saulnier.G-M. Perspectives pour l'observation hydrométéorologique des milieux de montagne. *Cahier de Géographie, Collection EDYTEM*, vol.8 :p147–156, 2009.
- [103] Sauquet.E. *Une cartographie des écoulements annuels et mensuels d'un grand bassin versant structurée par la topologie du réseau hydrographique*. PhD thesis, INPG, 2000.
- [104] Schaepli.B, Hingray.B, Niggli.M, and Musy.A. A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences (HESS)*, vol.2 :p73–117, 2005.
- [105] Seidel.K Schaper.J, Martinec.J. Distributed mappinf of snow and glacier for improved runoff modelling. *Hydrological Processes*, vol.13 :p2023–2031, 1999.
- [106] Kuligowski.R-J Scofiel.R-A. Status and outlook of operational satellite precipitation algorithms for extreme-precipitation events. *American Meteorological Society Journal*, vol.18 :p.1037–1051, 2003.
- [107] Simoni.S, Padoan.S, Nadeau.D-F, Diebold.M, Porporato.A, Barrenetxea.G, Ingelrest.F, Vetterli.M, and Parlange.M-B. Hydrologic response of an alpine watershed : Application of a meteorological wireless sensor network to understand streamflow generation. *Water Ressources Research*, Vol.47 :p.16, 2011.
- [108] Arnaud.Y Sirguey.P, Mathieu.R. Subpixel monitoring of the seasonal snow cover with modis at 250 m spatial resolution in the southern alps of new zealand : Methodology and accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, vol.113 :p160–181, 2009.
- [109] Fiel.R Sommer.W. Snow pack analyser (spa) for snow water equivalent (swe) and liquide water content. Technical report, Sommer Mess-Systemtechnik, 2009.
- [110] Soruco.A, Thibert.E, Vincent.C, Blanc.R, and Heno.R. Measurment of avalanche front velocity from high-speed terrestrial digital photogrammetry. In *EGU General Assembly - Vienna*, 2011.
- [111] Taillandier.A-S. *Evolution de la surface spécifique de la neige. Etudes expérimentales et de terrain, paramétrisation*. PhD thesis, Université josph Fourier - Grenoble I, 2006.
- [112] Thibert.E and Ravanat.X. Un site d'étude et de déclenchement d'avalanches : le col du lautaret. *Neige et Avalanche*, num 120, 2007.
- [113] Tissandier.G. Le nouvel observatoire du pic du midi. *La Nature*, pages p151–154, 1893.
- [114] Tourasse.P. Télénivomètres et imagerie satellitaire appliquée à la gestion prévisionnelle des stocks de neige : l'expérience d'edf. *La Houille Blanche*, vol.1 :p76–78, 2002.
- [115] Tralli.D-M, Blom.R-G, Zlotnicki.V, Donnellan.A, and Evans.D-L. Satellite remote sensing of earthquake, volacano, flood, landslide and coastal inundation hazards. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol.59 :p.185–198, 2005.
- [116] Trouvé.E, Vasile.G, Gay.M, Grussenmeyer.P, Nicolas.J-M, Landes.T, Koehl.M, and Chanuss.J. Combining optical and sar data to monitor temperate glaciers. In *International Geoscience And Remote Sensing Symposium, Seul : Corée, République de (2005)*, 2005.
- [117] Valery.A. *Modélisation précipitations – débit sous influence nivale, Elaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants*. PhD thesis, AgroParisTech - ENGREF, 2010.
- [118] Valla.F. Sarennes, un bassin versant de recherche et d'expérimentation nivo-glaciaire. *Annales des Ponts et Chaussées*, vol.87 :p.33–42, 1998.
- [119] Valla.F. Bilan de masse du glacier de sarennes, 50eme année de mesure. In *SHF Journée de Glaciologie, Grenoble 4-5 Mars 1999*, 1999.
- [120] Villecrose.J. Les avalanches de janvier et février 1999 dans les alpes du nord françaises, contexte nivométéorologique et comparaison avec les épisodes passés. *La Météorologie*, 8e série, num-32, 2001.
- [121] Vincent.C, Vallon.M, Reynaud.L, and Le Meur.E. Dynamic behaviour analysis of glacier de saint sorlin, france, from 40 years of observations, 1957-97. *Journal of Glaciology*, vol.46 :p.499–506, 2000.
- [122] Zakaluk.R and Sri Ranjan.R. Predicting the leaf water potential of potato plants using rgb reflectance. *Canadian biosystems engineering*, Vol.50, 2008.

Table des figures

1.1	Début du débordement du Vorz le 22 à 9h	5
1.2	Engrèvement progressif du lit et débordement sur les aménagements à partir de 10h	6
1.3	Curage du lit du torrent pour maintenir la capacité d'écoulement dès la fin de la matinée	6
1.4	Création de digues à partir des matériaux chariés pour canaliser le lit en fin d'après-midi	7
1.5	Début de la décrue le 23 Août au matin	7
1.6	Bilan des dégâts dans le hameau de la Gorge après la crue de Août 2005	9
1.7	Comparaisons morphologiques sur le lit du Vorz entre 2005 et 2007	10
1.8	Eboulement en face nord du Grand Pic de Belledonne à la suite de l'évènement de 2005	11
1.9	Localisation du bassin versant du Vorz en France	15
1.10	Localisation du bassin versant du Vorz en Rhône-Alpes	16
1.11	Bassins versants principaux de la bordure ouest du massif de Belledonne	17
1.12	Carte générale du bassin versant du Vorz	18
1.13	Diagramme climatique de la ville de Grenoble entre 1971 et 2000	20
1.14	Comparaison entre les stations du massif de Belledonne	21
1.15	Evolution du régime hydrologique sur le torrent du Doménon entre 1980 et 1990	22
1.16	Comparaison entre les débits de quelques rivières de la région du Massif de Belledonne	22
1.17	Evolution des précipitations et températures sur le massif alpin pour la fin du siècle	24
1.18	Impact probable du changement climatique sur l'enneigement et les débits des cours d'eau d'ici la fin du siècle	25
1.19	Eléments de géologie sur le bassin versant du Vorz	27
1.20	Cartographie des formations superficielles dans la partie supérieure du bassin versant	29
1.21	Occupation des sols sur la commune de Saint-Agnès et le bassin versant du Vorz	31
1.22	Carte des sous-bassins versants hydrologiques du Vorz	33
1.23	Cartes des sources et cours d'eau sur le Vorz	34
1.24	Géomorphologie et hydrologie sur le Vorz, deux caractéristiques liées	35
1.25	Recherche des crues dans les archives sédimentaires	37
2.1	Premiers véritables observatoires de Montagne français : L'Observatoire du Pic du Midi achevé en 1881 et l'Observatoire Vallot en 1890	46
2.2	Des premiers instruments de mesure de la pluie aux pluviomètres à augets modernes :1-Pluviomètre ancien Mangon.H (fin <i>XIX^{ème}</i>) 2-Pluviomètres à lecture manuelle 3-Pluviomètre à enregistreur 4-Pluviomètre à augets basculants	47
2.3	Instruments de mesures nivologiques :1-Perche à neige et sondage 2-Nivomètre 3-Sonde à ultrasons 4-Télénivomètre à rayonnement cosmique	49

TABLE DES FIGURES

2.4	Des premières mesures de la températures aux capteurs miniatures :1-Thermomètres anciens (Thermomètre à bulles, Antonini.D, 1612) 2-Sonde et capsule de protection 3-Thermomètre classique MétéoFrance 4-iButton 5-TinyTag	50
2.5	Instuments de mesure de l'insolation :1-Héliographe 2-Pyranomètre 3-Pyranomètre (<i>Campbell</i>)	51
2.6	Instuments de mesures hydrométriques :1-Jaugeage manuel au saumon 2-Saumon 3-Camion de jaugeage 4-ADCP	53
2.7	Carte de densité des station météorologiques en France (en Station/ km^2)	55
2.8	Carte de densité des stations hydrométriques en France (en Station/ km^2)	56
2.9	Répartitions altitudinales des stations météorologiques et hydrologiques en France et Rhône-Alpes	57
2.10	Exemples d'images aériennes du Vorz acquises dans le cadre des campagnes IGN de 2003 et 2009	61
2.11	Exemples de l'utilisation de l'imagerie Radar en hydrométéorologie : 1-Couverture des radars météorologiques métropolitains 2-Image radar des précipitations des crues cévenoles du 8-9 Septembre 2002 3-Exemple d'une image satellite radar du glacier d'Argentièrre (<i>Glacier d'Argentièrre, composition colorée de 3 images du satellite radar TerraSAR-X</i>)	62
2.12	Images acquises par satellites géostationnaires : Exemple d'un épisode neigeux de 2010 (a), et de la tempête Xynthia (b)	62
2.13	Exemple de l'utilisation de l'imagerie Satellite traditionnelle en hydrométéorologie : 1-Mosaïque d'images du satellite MODIS (250 mètres) 2-Image satellite LANDSAT (30 mètres) 3-Image de LANDSAT ETM7 (bandes 7-3-1 ; 30 mètres) 4-Image du Satellite ASTER (15 mètres)	63
3.1	Carte des altitudes du bassin versant du Vorz	78
3.2	Courbe hypsométrique du bassin versant du Vorz	79
3.3	Carte des expositions du bassin versant du Vorz	79
3.4	Répartition des expositions sur le Vorz	80
3.5	Carte des pentes du bassin versant du Vorz	81
3.6	Répartition des pentes sur le Vorz	81
3.7	Variations spatio-temporelles et evolutions des conditions météorologiques le 24 Novembre 2009	83
3.8	Variaitons temporelles du type de temps et conditions réelles sur le Vorz le 24 Novembre 2009	84
3.9	Variabilité spatiale de l'enneigement le 24 Novembre 2009	85
3.10	Plan d'instrumentation du bassin versant du Vorz	89
3.11	Station météorologique du Pleynet	91
3.12	Station météorologique du Refuge Jean-Collet	92
3.13	Station météorologique du lac Blanc	93
3.14	Carte des stations météorologiques sur le Vorz	93
3.15	Totalisateurs en place sur le Vorz	94
3.16	Principe de fonctionnement des totalisateurs	95
3.17	Quelques exemple de iButton sur le terrain et des aléas des milieux de montagne	96
3.18	Carte du réseau des iButton-Air et iButton-Sol sur le Vorz	98
3.19	Carte des transects et profils de répartition des iButton-Air et iButton-Sol sur le Vorz	99
3.20	Variations altitudinales le long des transects	100
3.21	Variations altitudinales le long des profils	100
3.22	mesure du débit par le cpateur IMAGE	103
3.23	Capteur IMAGINE sur le Vorz	104
3.24	Exemples d'images acquises sur le Vorz : 1-Décembre 2009 ; 2-Nuit Janvier 2010 ; 3-Fonte Juin 2010 ; 4-Ete 2011	104
3.25	Exemples d'images acquises sur les deux sites du Vorz	108
4.1	Historique d'acquisition des données de la caméra entre Octobre 2011 et Juin 2011	113
4.2	Quelques images de l'onde de crue	114
4.3	Une petite onde de crues estivale observée en 2009	115
4.4	Quelques images des forts débits	115
4.5	Exemple d'une crue de fonte sur le Vorz	116
4.6	Courbes de remplissage des totalisateurs sur le Vorz	118
4.7	Diagrammes climatiques des stations du Vorz	123

TABLE DES FIGURES

4.8	Quelques caractéristiques des températures sur le Vorz calculées à partir des iButtons (<i>moyenne, 1^{er} quartile, 3^{eme} quartile, maximum, minimum</i>)	125
4.9	Fonctionnement des iButton-Air	126
4.10	Fonctionnement des iButton-Sol	127
4.11	Différences entre les températures minimales et maximales	128
4.12	Différence moyenne des températures en fonction de la distance au support	129
4.13	Différences de mesures entre les Stations et les iButtons	131
4.14	Exemple d'enregistrement d'un iButton-Sol depuis 2 saisons	132
4.15	Gradient thermique moyen sur le Vorz calculé à partir des iButtons	133
4.16	Analyse des différences de température le long du Transect du Mousset	134
5.1	Elements principaux du capteur SnoDEC	145
5.2	Appareil numérique Pentax K200D	146
5.3	Installation du capteur SnoDEC sur le terrain : Contraintes des milieux de montagne	147
5.4	Carte du site du Lac Blanc et exemple d'images obtenues avec le capteur SnoDEC	148
5.5	Carte du site du Refuge et exemple d'images obtenues avec le capteur SnoDEC	150
5.6	Schéma structurel du système SnoDEC	151
6.1	Principe de détermination d'un angle dans l'espace	156
6.2	Correspondance entre coordonnées <i>Caméra</i> et coordonnées <i>Image</i>	157
6.3	Simulation de la prise de vue d'un MNT à partir d'une MTG définie	164
6.4	Exemple de fonctionnement de l'interface de calage développée pour le système SnoDEC	169
6.5	Exemple de rendu des images 3D dans l'interface	169
6.6	Interactions entre interface et paramètres d'angles	170
6.7	Processus de calage sur le site du Refuge	171
6.8	Processus de calage sur le site du Lac Blanc	172
6.9	Principe de l'algorithme des faces cachées implémenté	174
6.10	Processus de calage sur le site du Refuge Jean-Collet	176
6.11	Processus de calage sur le site du Lac Blanc	176
7.1	Structure d'un filtre de Bayer et exemple de réponse du capteur CCD associé	182
7.2	Espace des couleurs RGB représenté sous forme cubique	183
7.3	Espace des couleurs HSV représenté sous forme conique	184
7.4	Espaces des couleurs CIE-xyY représenté par le graphique de chromaticité (a) et CIE-L*a*b représenté sous forme de graphique 3D (b)	185
7.5	Exemple de détection par la technique des seuils : Efficace à gauche et perturbée par l'ombre à droite	186
7.6	Détection de la neige par utilisation de filtres numériques : 1-Image initiale; 2-Application d'un filtre de Sobel; 3-Résultat de la détection	187
7.7	Carte des probabilités d'enneigement : Forte probabilité (Blanc), Incertitude (Vert), faible probabilité (Rouge)	188
7.8	Exemple d'images à forts contrastes ombre/soleil	190
7.9	Exemple d'images face au soleil rendant la détection très difficile	190
7.10	Exemple d'images la détection est rendue difficile par le milieu (végétation, halo, brume,...)	191
7.11	Le logiciel de calibration des pixels enneigés	192
7.12	Représentation graphique de quelques composantes des droites de neige (général, ombre)	194
7.13	Schéma théorique de la structure d'un réseau de neurone (<i>Source Wikipedia</i>)	196
7.14	Exemple de structures de réseaux de neurones	197
8.1	Exemple de la cartographie de l'enneigement sur le site du Refuge Jean-Collet	204
8.2	Exemple de la cartographie de l'enneigement sur le site du Lac Blanc	204
8.3	Historique du fonctionnement du capteur SnoDEC	205
8.4	Cartes des résolutions spatiales théoriques du système SnoDEC sur les sites du Vorz	208
8.5	processus de sélection automatique des meilleures images journalières	211
9.1	Evolution de l'enneigement (en proportion de la surface visible) sur le site du Lac Blanc entre octobre 2009 et juin 2011	218

TABLE DES FIGURES

9.2	Evolution de l'enneigement (en proportion de la surface visible) sur le site du Lac Blanc entre octobre 2009 et juin 2011	219
9.3	Cartographie de l'enneigement entre octobre 2009 et juin 2011 sur les 2 sites expérimentaux du Vorz	221
9.4	Cartographie de l'enneigement entre octobre 2009 et juin 2011 sur les sites du Vorz	223
9.5	Cartographie de l'enneigement entre octobre 2009 et juin 2011 sur les sites du Vorz	224
9.6	Cartographie de l'enneigement entre octobre 2009 et juin 2011 sur les sites du Vorz	226
9.7	Cartographie de l'enneigement entre octobre 2009 et juin 2011 sur les sites du Vorz	227
9.8	Evolution des proportions d'enneigement mensuelles sur le site du Refuge	229
9.9	Evolution des proportions d'enneigement mensuelles sur le site du Lac Blanc	230
9.10	Evolution des proportions d'enneigement mensuelles sur le site du Refuge en fonction de l'altitude et de l'exposition	232
9.11	Evolution des proportions d'enneigement mensuelles sur le site du Lac Blanc en fonction de l'altitude et de l'exposition	233
10.1	Sélection des points de références potentiels pour la détermination de l'épaisseur du manteau neigeux	238
10.2	Evolution de la précision des pixels en fonction de la distance à l'appareil photographique	239
10.3	Schéma simplifié du mécanisme théorique d'une prise de vue photographique	241
10.4	Identification du Totalisateur dans l'image du bassin versant	241
10.5	Localisation des sites de référence sélectionnés pour le calcul des hauteurs de neige	243
10.6	Evolution des hauteurs de neige dans la partie supérieure du bassin versant du Vorz au cours de la saison 2009-2010	244
10.7	Evolution des hauteurs de neige à la Cabane du Pleynet depuis Novembre 2008	246
10.8	Carte du potentiel d'utilisabilité des images pour la détection des hauteurs de neige	248
10.9	Evolution glaciaire durant la saison 2009-2010	250
10.10	Vers un "bilan de masse" de la saison 2009-2010	251
10.11	Mouvements glaciaires sur le glacier de Freydane	251
10.12	Calcul des indices de végétation pour la saison 2009-2010 sur le site du refuge Jean-Collet	253
10.13	Evolution des caractéristiques RGB de l'image et indice de végétation correspondant	253
10.14	Indice de végétation et niveau d'enneigement au Refuge Jean-Collet (saison 2009-2010)	254
10.15	Période de floraison dans la partie médiane du bassin versant du Vorz	255
10.16	Période de décroissance de la végétation sur le Vorz.	256
10.17	Images issues des sites de Anterne équipés d'appareil photographiques automatiques	257
10.18	Exemples de cartographies d'enneigement sur le site de Anterne	258
11.1	10 évènements les plus intenses sur le Vorz au niveau des stations météorologiques et comparaison avec la station de Chamrousse	267
11.2	Comparaisons des enregistrements pluviométriques saisonniers de Chamrousse et des totaux du Vorz	271
11.3	Comparaisons des pluies journalières entre les différentes stations	274
11.4	Comparaisons des pluies journalières entre les stations du Vorz et la station de Chamrousse	275
11.5	Carte des zonages de chaque station en fonction des différentes méthodes d'estimations des distances utilisées	280
11.6	Relations du calcul des précipitations sur le versant en fonction de la position et de l'altitude	281
11.7	Evènement du 15 Mai 2010	282
11.8	Evènement du 5 Aout 2010	283
11.9	Evènement du 31 Mai 2011	284
12.1	Evolution des gradients thermiques mensuels généraux	290
12.2	Evolution des gradients thermiques horaires généraux	291
12.3	Principe de calcul des gradients locaux sur le bassin versant du Vorz	296
12.4	Evolution des températures pendant une journée printanière sur le Vorz	299
12.5	Evolution des températures pendant une journée estivale sur le Vorz	300
12.6	Evolution des températures pendant une journée automnale sur le Vorz	301
12.7	Evolution des températures pendant une journée hivernale sur le Vorz	302

TABLE DES FIGURES

12.8 Exemple d'une inversion thermique sur le Vorz	304
12.9 Evolution des températures durant une inversion thermique	304
12.10 Influence de la position et de la morphologie du versant dans la course du soleil et sur les températures en fonction de la saison	305
13.1 Exemple d'un enregistrement des températures par un iButton-sol	311
13.2 Dates de début d'accumulation de la neige en 2009 et 2010 sur le Vorz	314
13.3 Détermination des taux de fonte annuels sur le Vorz	315
13.4 Détermination des taux de fonte en fonction de l'exposition	316
13.5 Evolution des conditions d'enneigement au cours de la journée du 21 Octobre 2009	318
13.6 Evolution des surfaces enneigées au cours de l'évènement	319
13.7 Différence de répartition de la couverture neigeuse pour l'évènement étudié	319
13.8 Conditions météorologiques à la station du Lac Blanc durant l'épisode	320
13.9 Photographies et cartographies de la semaine du 1 ^{er} au 7 Octobre 2009 succédant l'épisode neigeux	321
13.10 Evolution de la couverture neigeuse au cours de la semaine succédant un épisode neigeux automnal	322
13.11 Enregistrement des températures et évolution de la limite de fonte au cours de la semaine succédant à l'épisode neigeux	323
13.12 Evolution des surfaces enneigées (en % de surface) en fonction de l'altitude d'après les données SnoDEC du Lac Blanc	325
13.13 Evolution des surfaces enneigées (en % de surface) en fonction de l'exposition d'après les données SnoDEC du Lac Blanc	326
14.1 Proposition de structure pour le futur modèle intégré du bassin versant du Vorz	351

TABLE DES FIGURES

Liste des tableaux

1.1	Enregistrement pluviométriques sur le massif de Belledonne pendant l'évènement pluvieux de Août 2005	8
1.2	Crues du Vorz enregistrées dans les archives historiques	38
1.3	Crues du Vorz enregistrées au cours du <i>XX^{eme}</i> siècle	39
3.1	Stations météorologiques et instruments disponibles sur le Vorz	90
3.2	Caractéristiques de la station météorologique du Pleynet	90
3.3	Caractéristiques de la station météorologique du Refuge Jean-Collet	91
3.4	Caractéristiques de la station météorologique du Lac Blanc	92
3.5	Liste des capteurs ibutton présents sur le Vorz	97
3.6	Appareils photographiques sur le Vorz	107
4.1	Mesures du totalisateur du Pleynet	117
4.2	Mesures du totalisateur du Refuge	117
4.3	Mesures du totalisateur du Lac Blanc	118
4.4	Estimation des précipitations annuelles d'après les totalisateurs	118
4.5	Quelques grandeurs remarquables sur les stations météorologiques du Vorz	120
4.6	Caractéristiques climatiques du bassin versant du Vorz	121
4.7	Comparaisons des mesures effectuées par les totalisateurs et les pluviomètres	121
4.8	Caractéristiques pluviométriques du bassin versant du Vorz	122
4.9	Gradients de température sur le Vorz	124
4.10	Différences de mesures entre les stations météorologiques classiques et les capteurs iButton	130
4.11	Températures moyennes et gradients sur les profils longitudinaux du Vorz	135
5.1	Tableau des coûts des composants du capteur SnoDEC	146
5.2	Caractéristiques physiques du Site du Lac Blanc	148
5.3	Caractéristiques physiques du Site du Refuge Jean-Collet	149
8.1	Tableau des taux de détection détaillés du capteur	209
8.2	Tableau des performances générales du système SnoDECC	209
8.3	Taux d'enregistrements des capteurs SnoDECC sur le Vorz	212
8.4	Fréquence et durée des manques d'images utilisables pour des raisons climatiques (fortes perturbations, brouillard,...)	213
10.1	Caractéristiques morphologiques des sites sélectionnés	243

LISTE DES TABLEAUX

11.1	Estimation de la fonctionnalité des pluviomètres du Vorz	265
11.2	Principaux événements pluvieux "estivaux" sur le Vorz	266
11.3	Mesures des totalisateurs sur les 3 sites du Vorz	268
11.4	Calcul du gradient orographique à partir des 3 totalisateurs du Vorz	268
11.5	Calcul des différences entre pluviomètre et la référence du totalisateur pour chaque site	270
11.6	Présentation des relations pluviométriques saisonnières entre les stations	271
11.7	Bilan des relevés estivaux (de Mai à Septembre) sur les pluviomètres du Vorz et de Chamrousse	272
11.8	Typologie de la relation selon les 4 situations météorologiques possibles entre les stations du Vorz et la Station de Chamrousse	273
11.9	Cohérence de la pluviométrie entre la station de Chamrousse et les stations du Vorz	274
11.10	Estimation de la pluviométrie journalière à partir des données de Chamrousse pour les stations du Vorz	275
11.11	Coefficient de correction pluviométrique entre les stations du Vorz et Chamrousse	276
11.12	Taux d'utilisabilité des stations sur le versant du Vorz au pas de temps journalier et horaire	278
11.13	Utilisation des différentes sources de données en fonction des variables temporelles de pas de temps et de période d'étude	278
12.1	Evolution des gradients thermiques mensuels moyens calculés à partir des iButtons	290
12.2	Evolution des gradients thermiques horaires moyen calculés à partir des iButtons	291
13.1	Date du début de l'accumulation du manteau neigeux définitif pour chaque saison sur le Vorz	312
13.2	Date de la fin de la fonte du manteau neigeux sur les sites iButtons du Vorz	313
13.3	Taux d'ablation mesurés par analyse des données SnoDEC en fonction de l'altitude sur le bassin du Vorz	327
13.4	Taux d'ablation mesurés par analyse des données SnoDEC en fonction de l'exposition sur le bassin du Vorz	328

Annexes

Table des Annexes :

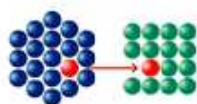
Annexe 1 : Nouveau Chapitre de la Thèse

Annexe 2 : Liste des Sites iButton

Annexe 3 : Liste des station météorologiques

Annexe 4 : Colloques et publications

Nouveau Chapitre de la Thèse (*NCT*[®]) :



Association Bernard Gregory
www.abg.asso.fr



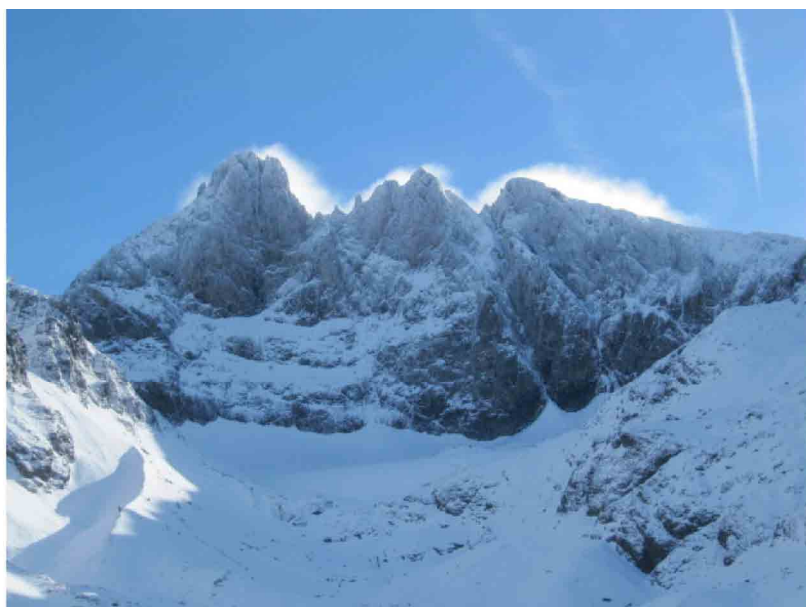
*Valorisation des compétences des docteurs
«un nouveau chapitre de la thèse ®»*

Thierry BARTH

Ecole Doctorale SISEO — université de Savoie

Nom du Mentor: Jean-Philippe ARIE

Instrumentation et Modélisation des processus Hydro-Météorologiques en Montagne



Sujet académique de la thèse:

« Instrumentation et Modélisation des processus hydrométéorologiques des bassins versants de montagne, Application au bassin versant du Vorz (Belledonne, 38) »

Directeur de Thèse: M^r Jean-Jacques DELANNOY

Co-Directeur de Thèse: M^r Georges-Marie SAULNIER

Date probable de présentation du « NCT »: Septembre 2011

Date probable de Soutenance de thèse: Fin Novembre / Début Décembre 2011



UNIVERSITE
CHAMBERY
ANNECY SAVOIE



Laboratoire

EDYTEM

Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne

Cadre Général et Enjeux:

Une thèse est bien plus que 3 années d'études supplémentaires. Elle constitue en réalité une expérience professionnelle extrêmement enrichissante dotée d'une densité d'apprentissages considérables. Ainsi, la gestion du temps, des moyens techniques et de ses compétences est un élément essentiel pour son bon déroulement, et permet d'acquérir un véritable sens de la gestion de projet de recherche et parfois même de développement, valorisable par la suite.

Présentation générale de la Thèse:

⇒ L'eau, la Montagne et la Recherche...

Le 22 Août 2005, de violentes pluies se produisent sur les parties hautes du massif de Belledonne, entraînant le développement d'importantes laves torrentielles sur la bordure ouest du massif. Le village de La Gorge (commune de Saint-Agnès) est le plus fortement touché par ces crues avec plus de 7 millions d'euros de dégâts, mais heureusement aucune victime à déplorer grâce à l'évacuation des habitants. A la suite de cet événement, la Communauté de commune des Balcons de Belledonne a décidé de mettre en place une étude approfondie du bassin versant, afin de mieux comprendre les mécanismes de déclenchement des crues et d'essayer de les anticiper dans le futur. Le laboratoire EDYTEM a été chargé de l'étude et a mis en place un groupe de travail sur cette problématique.

Cet état des lieux du bassin versant vis-à-vis des risques de crues, a initié la réalisation d'études plus poussées sur la météorologie et l'hydrologie locale, afin de mieux comprendre les processus régissant leur déclenchement, tout en essayant de se prémunir des risques associés aux futurs événements orageux qui ne manqueront pas de se produire. Dans le même temps, les évolutions climatiques actuelles conduisent à penser que la fréquence et l'intensité des crues, ainsi que la disponibilité des ressources en eau vont évoluer dans les prochaines décennies. Ainsi, outre la problématique de la perception du risque, certains conflits d'usages entre gestionnaires de la ressources (exploitation hydroélectrique,...), populations locales et utilisateurs (agriculteurs, domaines skiables,...) pourraient voir le jour. Afin d'anticiper ces évolutions notamment liées à celles de la pression foncière et de la la disponibilité des ressources en eau, la compréhension des mécanisme hydro-météorologiques est essentielle, en particulier en zone de montagne.

⇒ Mon projet de Recherche:

Dans ce cadre, mon sujet de thèse s'inscrit comme une initiation du vaste travail de recherche qu'il est nécessaire de réaliser. Il s'agira donc dans un premier temps de constituer une base de données météorologiques conséquente, permettant de mieux comprendre les phénomènes météorologiques locaux particulièrement variables spatialement et temporellement sur des zones très restreintes. Ainsi, un réseau de mesure hydrométéorologique a été mis en place (régime hydrologique, températures, précipitations,...), et déployé progressivement depuis Novembre 2008.

L'ensemble de ce réseau a été construit de manière originale, puisqu'il est constitué d'un grand nombre de stations ponctuelles partielles, et non pas d'une seule station complète, à partir de la quelle les données seront extrapolées sur l'ensemble du bassin.

Dans un second temps, un travail d'innovation a été mené afin de développer des capteurs permettant de mesurer des paramètres plus complexes, tels que la couverture neigeuse, à des pas de temps relativement fin avec des résolutions, de l'ordre d'une dizaine de mètres. Ce travail a abouti à un capteur innovant de détection automatique de la couverture neigeuse en temps réel, à haute résolution spatiale (10 mètres) et temporelle (infra-journalière), basé sur l'analyse d'images acquises automatiquement par des appareils photographiques numériques installés sur le versant.

Le dernier temps de cette thèse a pour objectif de convertir l'ensemble des observations effectuées en une meilleure compréhension des mécanismes nivologiques et hydrologiques. Cette connaissance permettra alors de modéliser le comportement des différentes variables (pluviométrie, températures, neige,...) et aboutira à la construction d'un modèle de fonctionnement hydrologique du versant. Il sera ainsi possible de modéliser le comportement de la variable clef du système en montagne: la neige. Celle-ci permettra dès lors de simuler les régimes hydrologiques des torrents, et de déterminer les périodes de risques de crues, ainsi que la disponibilité en eau sur le bassin versant, facilitant sa gestion tant au niveau des ressources en eau que des risques de crues.

Ma Thèse dans son contexte:

► Projet — Financeurs — Partenaires, une équipe indissociable:

Le projet de thèse s'inscrit dans la continuité directe du « projet Vorz » mené en 2005 par le laboratoire EDYTEM. Dans ce contexte, bien que le projet bénéficie de financements ministériels (Allocation de Recherche) et de la part de l'Université (Instrumentation), il reste en collaboration avec la Communauté de commune des Balcons de Belledonne, et en particulier celle de Saint-Agnès. Au cours du « projet Vorz », les études se sont focalisées sur deux thématiques principales: les archives (Equipe I) permettant de retracer et dater les évènements de crues (archives naturelles lacustres, archives administratives) et la dynamique (Equipe II) du bassin versant (géologie, hydrogéologie, géomorphologie,...) permettant de comprendre les processus de surface se produisant sur le bassin. Au cours du projet de thèse, le travail de collaboration avec les différentes équipes du laboratoire s'est poursuivie, notamment avec l'équipe des archives environnementales (Equipe I) qui possède des équipements sur le Lac Blanc de Belledonne et avec laquelle plusieurs missions de terrain ont été mutualisées.

Le volet principal du projet étant l'instrumentation, celui-ci s'est fortement appuyé sur la plateforme « métrologie » du laboratoire qui fournit une aide à l'installation d'équipement de mesures, et au développement de nouveaux capteurs et systèmes. Dans ce cadre, un ingénieur d'étude rattaché à cette plateforme a été mobilisé à de nombreuses reprises et collaborait à l'entretien du réseau, ainsi qu'à la veille technologique sur les capteurs de mesures (iButton,...).

➡ Un milieu en perpétuelle évolution, concurrentiel et parfois confidentiel:

Au cours de la thèse, un capteur innovant et original de mesure de la couverture neigeuse a été mis au point. Dans ce domaine assez novateur, il n'existait pas de système concurrent sur le marché, mais, plusieurs équipes scientifiques avaient déjà travaillé sur cette problématique depuis une dizaine d'années, avec l'avènement de l'ère du numérique pour les appareils photographiques. Ainsi, nous n'avons subi aucune concurrence au niveau industriel, cependant, au niveau scientifique international, notre système devait montrer son originalité et son efficacité, ce qu'il a réussi avec succès lors de différents colloques internationaux, avec plusieurs demandes de collaborations ou d'installation du capteur.

Au niveau plus national et industriel, les caractéristiques du capteur (SNODEC) ont rapidement attiré l'intérêt de plusieurs partenaires potentiels (laboratoires, industriels,...) souhaitant utiliser ce matériel. Dans ce contexte, l'aspect haute résolution à faible coût de ce capteur permet d'être hautement compétitif vis-à-vis des techniques traditionnelles telles que les relevés manuels du manteau neigeux ou encore les outils d'observations satellites. Au niveau opérationnel, le capteur permet de fournir aux utilisateurs des informations en temps réel sur l'état du manteau neigeux, informations indispensables pour estimer et quantifier les quantités d'eau disponibles lors de la fonte des neiges, et donc très intéressantes pour les compagnies de gestion de l'eau et de production hydroélectrique. Depuis quelques semaines, un partenariat avec la CNR est envisagé afin de tester le capteur en conditions opérationnelles, ainsi que comparer les résultats obtenus par celui-ci et son modèle associé, aux techniques de modélisation et quantifications habituellement utilisées.

Le milieu de l'instrumentation et la modélisation en montagne est en perpétuelle évolution, notamment en raison de la progression rapide dans le domaine des capteurs de mesures. De plus, on touche là une problématique aux enjeux économiques et sociétaux essentiels: la ressource en eau. Ainsi, de nombreux acteurs sont susceptibles d'être intéressés par les avancées dans ce domaine et peuvent donc s'y impliquer (financement, collaboration,...), que ce soit au titre de la recherche appliquée ou pour des travaux plus confidentiels pour des raisons de concurrence entre grands groupes.

Ma place dans ce Contexte:

⇒ Un cursus universitaire varié et... une suite logique: LA THESE:

Ma thèse s'inscrit dans un cursus universitaire et professionnel orienté vers une thématique récurrente: la montagne. En effet, passionné par ce milieu et son fonctionnement hydrologique, geomorphologique et climatique, l'ensemble des formations que j'ai réalisées s'inscrivent dans cette continuité. Ainsi, mon sujet de thèse marque l'aboutissement de nombreuses années d'études sur celui-ci, par une étude complète allant de l'observation à la modélisation de l'eau en montagne.

Issu d'un baccalauréat Scientifique (2002), j'ai rapidement orienté ma formation vers le milieu des Sciences de la Terre avec une forte composante fondamentale (Mathématiques, Physique, Chimie,...) durant mes premières années d'études (Deug Science de la Terre et de

l'Univers, Université Paris 7, 2004). Puis, afin de donner une coloration montagne à mon cursus, j'ai rejoint l'Université de Savoie pour finaliser ma Licence (Licence Science de la Terre et de l'Environnement, Université de Savoie, 2005).

A la suite de ma Licence, j'ai décidé de m'orienter vers le milieu professionnel des Géosciences appliqués à l'Ingénierie et l'Aménagement en montagne, au travers du Master Professionnel GAIA de l'Université de Savoie (2007). Au cours de ce master, j'ai réalisé un stage à la Société des Montagne de l'Arc (Les Arcs, Savoie), chargée de l'exploitation du domaine skiable. Dans ce cadre, une retenue collinaire destinée à l'enneigement de la station était en construction. Mon rôle a alors été de quantifier l'impact hydrologique de cette retenue, notamment dans un contexte de transfert d'eau inter-bassins et de changements au niveau des risques de crues, au travers de modélisations hydrologiques. Au cours de ce travail, j'ai réalisé un « véritable » projet de recherche, qui m'a fait prendre conscience de mon goût pour la recherche et la modélisation hydrologique.

Afin de réorienter mon cursus vers la recherche, j'ai donc réalisé un nouveau Master Recherche en Géorisques et Informations Environnementale à l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée (2008). Ce master a été l'occasion de me spécialiser dans la gestion des risques naturels et les techniques d'analyses géographiques (SIG, Télédétection). A cette occasion, j'ai réalisé un stage à l'Institut de la Montagne (Université de Savoie), entièrement porté sur la modélisation des bassins versant de montagne, avec notamment la mise en place d'un modèle de stock de neige et hydrologique associé. Ce travail très fondamental m'a permis de développer les compétences techniques essentielles à la poursuite de mon cursus vers une thèse en hydrologie.

➡ La Thèse, le pourquoi du comment ?

Le projet de thèse auquel j'ai participé a été construit avant mon intégration à l'équipe. En effet, celui-ci faisait suite au « projet Vorz », comme on l'a vu précédemment, et faisait l'objet d'une demande d'allocation. A ce titre, j'ai candidaté sur ce projet pour lequel j'ai été sélectionné. De fait, je n'ai pas participé à la construction du projet et aux recherches de financements initiaux. Cependant, j'ai contribué à l'ensemble de la gestion opérationnelle et financière ultérieure.

En conclusion cette thèse marque l'aboutissement de 9 années d'études consacrées à l'étude de la montagne, et plus particulièrement ses caractéristiques hydrologiques et météorologiques. Au cours de ce cursus, j'ai non seulement développé de solides capacités techniques dans ces domaines, mais également dans ceux de la gestion des risques et de la pratique des outils de cartographie numérique (SIG, Télédétection,...). Ainsi, au lendemain de ma soutenance, je posséderai les compétences de spécialistes dans le domaine de l'hydrologie de montagne, l'instrumentation hydro-météorologique de ces milieux, la gestion des réseaux de mesures et la modélisation (hydrologique et nivologique) de cet environnement complexe que constitue la montagne.

Déroutement, Gestion et Financement:

Réussir sa Thèse, c'est finalement réussir à gérer son Projet. Ainsi, des phases de préparation à la planification, en passant par le financement et la gestion du déroulement du projet en lui-même et de ses délais, c'est l'ensemble de la chaîne qu'il faut être capable de maîtriser, pour avancer dans cette expérience, et ce, jusqu'à la soutenance.

Préparation et cadrage du projet:

⇒ La gestion du risque:

Il est toujours délicat de cadrer et planifier un projet de recherche exploratoire. En outre dans mon projet de thèse, il existait également un facteur de risques liés à la conduite d'instrumentations dont le résultat pouvait être aléatoire. En effet, installer un réseau de mesures météorologiques, soumis à des aléas climatiques importants durant une grande partie de l'année, peut entraîner nombre de dysfonctionnements, notamment dans un milieu difficile comme la montagne. Ainsi, lors de l'initiation du projet, les probabilités d'utilisabilité des données de bases indispensables à la modélisation ont été prises en compte, et, plusieurs points de replis ont été déterminés.

En ce qui concerne le réseau d'instrumentation météorologique général, en cas de faillite du système, un autre terrain d'étude comportant un historique et une palette de données importante était disponible, il s'agissait d'une région quelques peu différente, les Cévennes, mais pour laquelle la problématique de crues était réelle. Au niveau des appareils photographiques et de la création du capteur de détection de la couverture neigeuse, en cas de non-acquisition de données sur le bassin versant d'étude, une base de données existant sur un autre bassin versant de montagne était disponible. Les premiers tests de faisabilité du capteur ont d'ailleurs été réalisés sur ce jeu de données. Il existait donc au départ de cette thèse de forts risques de faillite du système d'acquisition de données, et, nous disposions d'un peu plus d'un an et demi pour nous adapter et utiliser les terrains de repli en cas de nécessité.

➡ Ressources humaines et partenariats::

Le projet s'est déroulé autour d'une équipe très restreinte (3 personnes: 1 chargé de recherche, 1 Ingénieur d'étude, 1 doctorant), et n'a pas nécessité la contribution de partenaires, ou la mobilisation de financements externes à l'équipe (Université/Ministère). En effet, comme nous l'avons dit précédemment, nous disposions d'une allocation de recherche de la part du ministère, ainsi que d'un financement de la part de l'Université de Savoie pour l'instrumentation sur le terrain. Ce projet n'étant pas conduit au sein d'un groupe de travail plus important type ANR ou INTERREG, il n'a pas nécessité de partenaires extérieurs au laboratoire. Cependant, à plusieurs reprises, nous avons collaboré avec des membres de l'équipe « Archives environnementales », puisqu'elle travaillait sur des terrains d'études identiques ou similaires, et disposait de certaines données utilisables dans notre projet (base de données photographique).

➡ Contraintes de confidentialité et gestion de la propriété intellectuelle:

Une volonté de confidentialité:

A l'origine, le projet ne se voulait être qu'exploratoire et ne devait pas déboucher sur la création d'un quelconque résultat potentiellement commercial directement après la fin du projet. En conséquence, en début de thèse, il n'existait aucune procédure de confidentialité du travail, et encore moins de procédures de brevet en perspective. Cependant, au fur et à mesure du développement des travaux et de l'état d'avancement du capteur de détection de la couverture neigeuse, nous avons pris conscience de l'utilité de nous prémunir contre la concurrence. Ainsi, bien qu'ayant communiqué sur les résultats et principes de la méthode de mesure, notamment à l'occasion de colloques internationaux, nous nous sommes prémunis en ne dévoilant en aucun cas les spécificités de traitement nécessaires à la création du capteur.

Vers le dépôt d'un Brevet:

De plus, au cours de ces différentes rencontres et conférences, un intérêt clair a été identifié pour notre capteur, et il est devenu évident qu'il nécessiterait à terme le probable lancement d'une démarche de commercialisation. Depuis plusieurs mois, des précautions de confidentialité ont donc été prise tacitement au sein de l'équipe, notamment avec une non-communication des techniques innovantes du capteur, mais également en réfléchissant à la mise en place futur d'un brevet sur un élément spécifique du capteur restant à définir.

Conduite du Projet:

➡ Gestion des conflits et difficultés de planification:

Les relations et interactions avec d'éventuels partenaires ou équipes scientifiques n'ont pas posés de problèmes particuliers durant le projet, excepté très ponctuellement à des périodes critiques de l'année. En effet, les phases d'instrumentations se réalisant souvent au mois de Juin, afin de vérifier le matériel ayant passé l'hiver sur le terrain, et d'observer le fonctionnement des nouvelles installations durant une période clémente, ce mois était particulièrement chargé en missions de terrains, d'autant plus que la contrainte de la météorologie venait ajouter des complications. Cependant, le fait de posséder un bassin versant muni d'équipements, certes nombreux mais légers, permettait de réaliser des missions éclairs sur une journée en s'adaptant ainsi aux contraintes d'emploi du temps de chacun. Le même type de problématiques s'est posé pour la vérification pré-hivernale du matériel, souvent effectuée au mois d'Octobre et qui devait pour toutes les équipes être effectuée avant les premières chutes de neige. Ainsi, malgré quelques tensions ponctuelles, l'organisation des missions terrains n'a à proprement parlé pas posé de problème majeur.

➡ La planification, une tâche difficile en Recherche:

Le projet étant à l'origine destiné à un travail exploratoire, il a été très difficile en début de thèse de construire un planning précis, d'autant plus que celui-ci dépendait des résultats obtenus

sur le terrain. Dans ce contexte, nous avons préféré déterminer plusieurs grandes thématiques et fixer une date à partir de laquelle la phase exploratoire serait stoppée, et après laquelle nous passerions en phase d'utilisation, d'interprétation et de valorisation. De fait, nous avons déterminé deux thématiques prioritaires:

- Instrumentation du bassin versant: type de capteur, entretien du réseau, gestion,...
- Modélisation de l'hydrologie: Quantification des températures et précipitations, modélisation nivologiques, puis hydrologiques

Dans un second temps, au vu du démarrage du projet en Octobre 2008, nous avons décidé en attendant de posséder les premières données hydrométéorologiques du bassin de développer un capteur de cartographie automatique de la couverture neigeuse à partir de simples photographies numériques. Une thématique annexe a donc été ajoutée à nos priorités assez rapidement (Janvier 2009):

- Développement d'un capteur innovant

Ces grandes lignes conductrices nous ont permis de garder une certaine souplesse durant les phases exploratoires, tout en gardant à l'esprit l'existence d'une deadline pour la fin de celle-ci. Cependant, la grande difficulté est finalement venue de cette souplesse, puisque le projet a parfois eu tendance à ne pas garder une ligne conductrice suffisamment précise et ces divagations ont coûté du temps à l'étude. Une solution a été utilisée ponctuellement mais aurait dû être plus développée, il s'agit du renforcement de l'équipe par un stagiaire. Dans ce cadre il aurait été possible de lui confier l'exploration des parties très théoriques et des techniques de bases, afin de se dégager du temps pour travailler plus en profondeur sur les processus de modélisation qui de fait ont été moins abordés durant cette thèse.

➡ Organisation des phases de travail:

Les réunions d'équipe ont fait partie intégrante du processus d'exploration, ainsi, lors de la première phase du projet, celle-ci étaient rarement programmées, très ponctuelles mais d'une fréquence assez importante (2 à 3 fois par semaine). Dans un second temps, la fréquence des réunions de travail a baissé, et il a donc été nécessaire de planifier de manière informelle des réunions d'avancement pour faire le point sur les méthodes mises au point et discuter de leur avenir et utilisations possibles. Ainsi, au cours du projet l'autonomie a pris une place de plus en plus grande, pour arriver à des réunions approximativement bi-mensuelles permettant de faire officiellement le point sur l'avancement des travaux.

En l'absence de deadline définitives fixées en début de projet, nous en avons déterminé plusieurs au fur et à mesure de l'avancement, par l'intermédiaire de participation à des colloques, qui nous permettait de faire une pause dans les travaux, et de faire le point sur l'état du projet. Nous avons eu recours à ce type de deadline essentielles à 4 reprises au cours du projet, à l'occasion de colloques internationaux.

En définitif, malgré la difficulté de planifier le projet dans son ensemble, celui-ci a été planifié de plus en plus précisément au fur et à mesure de son avancée. Il a donc été possible de réaliser la majeure partie des tâches fixées en début de thèse, et, surtout, de répondre à la plupart des grandes problématiques posées lors de la construction du projet.

⇒ Structure finale du projet:

Le tableau suivant présente l'organisation et la structure finale qu'aura adopté le projet. On y trouvera les principales tâches et étapes de celui-ci regroupé en fonction de leur thématique: Instrumentation, Modélisation et Communication. Les étoiles représentent les principales deadlines fixées pour ce projet et au moment desquelles un état des lieux général de l'avancement a été réalisé.

	Semestre 1 <i>Oct. 2008 - Avril 2009</i>	Semestre 2 <i>Avril 2009 - Oct. 2009</i>	Semestre 3 <i>Oct. 2009 - Avril 2010</i>	Semestre 4 <i>Avril 2010 - Oct. 2010</i>	Semestre 5 <i>Oct. 2010 - Avril 2011</i>	Semestre 6 <i>Avril 2011 - Oct. 2011</i>
INSTRUMENTATION	Installation Caméra HyMAGE (Nov. 2008)	Installation iButtons (Sept. 2009)	Installation Stations Météo & Appareils (Oct. 2009)	Recolte et traitement des données (Saison 1): Stations Météo & iButton Images	Installation projecteur Infra-Rouge & Camera HD	Recolte et traitement des données (Saison 2): Stations Météo & iButton Images
	Vérification & Collecte & Entretien permanent		Vérification & Collecte & Entretien permanent		Vérification & Collecte & Entretien permanent	
MODÉLISATION	Bibliographie Modélisation (TopMODEL, neige,...) Apprentissage programmation (Fortran) Etude faisabilité Capteur SNODEC	Apprentissage programmation (Java) Réalisation Capteur SNODEC (3D) Création Interface utilisateur (3D)	Réalisation Capteur SNODEC (image) Création Interface utilisateur (images) Premiers Tests capteur SNODEC	Création des cartes d'Enneigement Etude bibliographique extrapolation des températures Statistiques thématiques enneigement (Application SNODEC Vorz)	Création des cartes de Températures Utilisation des images pour générer des données ponctuelles (isotherme, fonte,...) Bibliographie Modélisation nivologique	Création du modèle nivologique de type °C/jour Exploitation des images (disparités altitudes, expositions,...)
COMMUNICATION			EGU 2010 Colloque International 2 communications ORAL Mai 2010 Séminaire Aee SNG Laboratoire EDYTEM Décembre 2009 Instrumentation Lucht Meteo- en Schiedamsche Aard 2010	EGU Leonardo - Hydrology Colloque International 1 ORAL & 1 Poster Novembre 2010 Séminaire Instrumentation Laboratoire EDYTEM Mars 2010 Journée des Doctorants Laboratoire EDYTEM Communication Scientifique Juin 2010	Colloque SHF Colloque National Mars 2011 EGU 2011 Colloque International 1 Oral & 2 Posters Avril 2011 REDACTION DU MANUSCRIT DE THESE	Déjeuner scientifique, John de Soto Agave, Communication Scientifique November 2011 1 ^{er} Octobre 2011

Compétences et Savoir-Faire:

	COMPÉTENCES	
EXPERTISE	Scientifique	Hydrologie et Météorologie en Montagne Modélisation Nivologiques & Hydrologiques Calcul d'interpolation et modélisation des Températures et Pluies Utilisation de l'imagerie en environnement Mise en place et entretien de réseaux d'instrumentation environnementaux Risques naturels
	Technique	Calcul et modélisations numériques (Java, Fortran) Cartographie Numérique (SIG: MapInfo, ArcGIS) Techniques d'instrumentation environnementales / Gestion des réseaux Gestion de bases de données

	COMPÉTENCES	
GESTION DE PROJET	Conduite de Projet	Gestion d'un budget (~250 000 euros) Planification des étapes du projet Définitions des Deadline en cours de travail
	Communication	Synthétiser, Organiser, Présenter et Expliquer les connaissances scientifiques Présentation du projet à des spécialistes (colloques internationaux) Présentation du projet au grand public (intervention lycées). Communication avec les acteurs locaux (mairies,...) et population (réunions de restitution)
	Méthode de travail	Détermination des grandes étapes Phases de réflexion et exploration Innovation (Capteur SNODEC)
	Gestion du temps	Gestion des problématiques liées au terrain (météo, difficulté accès,...) Planification des tâches d'instrumentation
	Travail en Equipe	Animation réunion de travail: Exploration, bilan,... Coordination de certaines missions terrain avec d'autres équipes

	COMPÉTENCES	
SAVOIR-FAIRE	Administratif	Connaissance des contraintes de gestion de projets de recherche
	Linguistique	Anglais scientifique international: parlé (colloque) & écrit (publications)
	Organisationnel	Capacité d'organisation pour la gestion d'un projet de recherche appliqué en milieu difficile (montagne)

	COMPÉTENCES	
QUALITÉS PERSONNELLES	Scientifique	Motivation pour le travail de recherche Organisation / Rigueur Puissance de travail Ténacité / persévérance / Volonté Autonomie / Indépendance Goût pour relever des défis Adaptabilité / Souplesse Curiosité / Goût pour la nouveauté
	Technique	Connaissance de l'hydrométéorologie de montagne Capacité en instrumentation hydrométéorologique Développement de capteurs de mesures originaux & innovants Modélisation de la nivologie et de l'hydrologie en montagne Programmation informatique: Java (interface utilisateur, travail sur serveur,...), Fortran (Calcul numérique et cartographie), HTML/CSS (Site internet basique) Gestion des risques / Évolution en milieux difficiles

	COMPÉTENCES	
RÉSEAU	Local	Acteurs locaux: Communauté de commune des Balcons de Belledonne, Mairie de Saint-Agnès
	National	Travail en collaboration avec la CNR
	International	Contacts professionnels: Suisse (Davos, Lausanne), Autriche, Espagne

	COMPÉTENCES	
TRANSFÉRABILITÉ DES CONNAISSANCES	Secteur Professionnel	Création de capteurs environnementaux (Bureaux d'études) Modélisation des stocks en eau sur les bassins versants: organisme de gestion de l'eau (EDF, CNR), communes, stations de sports d'hiver,... Programmation Numérique
	Secteur Universitaire	Compréhension des mécanismes météorologiques et hydrologiques en montagne (laboratoires de recherche) Capacité d'enseignement (monitorat) Médiation scientifique auprès du grand public et dans le cadre scolaire

Résultats et Impacts de la Thèse:

Il est toujours difficile de tirer le bilan de 3 années de recherches passionnantes et enrichissantes, ayant été menées sur un grand nombre de domaines. Ce travail fastidieux, de bilan, synthèse, explication et présentation qu'est la rédaction du manuscrit permet cependant de dégager les points essentiels de ses recherches et les avancées majeures, ainsi que leur impacts probables dans le futur.

Résultats:

Comme on l'a vu précédemment, les résultats associés à ce projet de thèse sont à la fois fondamentaux et opérationnels. En effet, on peut dégager trois grandes idées et innovations de ce travail:

1. Nouvelle approche de l'instrumentation hydrométéorologique en montagne.

Au cours de la thèse, nous avons mis en place un réseau d'instrumentation hydrométéorologique original sur le bassin versant du Vorz (Belledonne). En effet, traditionnellement, les réseaux classiques utilisent des stations de mesures globales, où toutes les grandeurs sont mesurées très précisément au même endroit. Ainsi, ces stations sont relativement coûteuses et il n'est pas possible d'en installer un grand nombre. Dans notre cas, nous avons choisi d'équiper le versant par des sites de mesures ponctuels (pluie, températures, insolation, hydrométrie,...), mais dont la résolution spatiale et temporelle est bien supérieure aux réseaux classiques.

2. Développement d'un capteur innovant de cartographie automatique de la couverture neigeuse:

La création du capteur SNODEC (Système Nivologique Opérationnel de Détection de l'Enneigement en Continu) a représenté la plus grande charge de travail de ce projet (environ 2 ans). Néanmoins, il est à l'heure actuel l'appareil le plus efficace de sa catégorie. En effet, avec de simples appareils photographiques numériques, réalisant l'acquisition des images en continu sur le bassin versant, nous sommes capables de dresser en temps réel (moyennant une télé-transmission des données) la cartographie de la couverture neigeuse avec une résolution d'une dizaine de mètres dans le pire des cas. Ainsi, grâce à cet appareil, on pallie au manque de données chroniques dont souffrent la plupart des bassins versants de montagne instrumentés.

3. Modélisations météorologiques, nivologiques et hydrologiques spatialisées adaptées aux zones montagne:

La modélisation hydrométéorologique est toujours une problématique complexe en montagne, du fait de la forte variabilité climatique spatio-temporelle de ces milieux où les expositions, altitudes, ou encore pentes varient localement de manière considérable et influent fortement sur les conditions climatiques. Le réseau de mesure déployé sur le versant nous permet d'aborder la problématique de manière différente, puisque dans notre cas, le facteur limitant n'a pas été le manque de données, mais plutôt notre capacité à les utiliser et interpoler de

façon convenable. Ainsi, nous avons mis au points une technique d'interpolation des températures à haute résolution spatiale et temporelle reposant sur notre réseau de mesure original. De la même manière, les données de couverture neigeuse nous permettent de contraindre et réaliser des modélisations nivologiques de qualité en fonction des altitudes et des orientations en particulier. Enfin, la modélisation hydrologique découlant de l'ensemble de ces facteurs, il sera aisé de construire des simulations pertinentes à partir de ces différentes techniques.

Les conséquences scientifiques du travail réalisé vont voir le jour sous forme d'un dépôt de brevet sur certaines techniques spécifiques développées durant ces 3 années. De plus, ces brevets et ces travaux seront utilisés et valorisés dans le cadre de la création d'une Start-up au cours de l'année 2012.

Au niveau du laboratoire, mon travail a permis à différentes équipes de mettre en place des expériences nouvelles par l'intermédiaire du capteur photographique. Le laboratoire dispose également aujourd'hui d'un nouveau site d'étude sur lequel une base de donnée hydrométéorologique conséquente est disponible, et pourra être exploitée, sur des points plus spécifiques, par de futurs doctorants s'intéressant aux températures, aux mécanismes hydrologiques ou à la modélisation de la neige.

Sur un plan personnel, cette thèse m'a permis de développer de nouvelles compétences, notamment en programmation informatique, maîtrise des outils 3D et du traitement de l'image. Ainsi je dispose aujourd'hui de connaissances appliquées dans le domaine de l'hydrologie de montagne, ainsi que des capacités nécessaires à la création d'outils spécifiques à leur observation, compréhension et modélisation.

Perspectives Scientifiques:

Les perspectives scientifiques de ce travail sont nombreuses. En premier lieu, l'installation de l'instrumentation sur le versant a permis de créer un nouveau site d'étude pour le laboratoire et la communauté scientifique. Cependant, malgré le maintien des équipements sur le site, il est difficile de savoir si celui-ci sera entretenu régulièrement, car compte tenu du caractère chronophage de cette tâche, il n'est pas certain que je disposerai de temps pour réaliser cela bénévolement.

Du point de vue de la modélisation, de nouvelles techniques ont été explorées et devraient à terme trouver leur place dans un modèle intégré de gestion des ressources en eau pour les bassins versants de montagne, parfois vulnérables (stations de sports d'hiver, installations hydroélectriques,...) ou présentant un risque pour les populations (crues torrentielles).

Enfin, la perspective la plus marquante de ce projet est probablement la création du capteur de mesure automatique de la couverture neigeuse. Celui-ci fait d'ailleurs l'objet d'une étude de possible valorisation au sein d'une start-up d'instrumentation et modélisation de l'hydrométéorologie en montagne.

Perspectives Professionnelles:

Au travers de cette thèse, j'ai évolué à la fois dans le milieu de la recherche fondamentale, et dans celui de l'hydrologie opérationnelle en montagne, m'ouvrant ainsi différentes perspectives de travail futures. De plus, ayant réalisé un Monitorat durant la thèse, j'ai développé des compétences en terme de transmission des connaissances et médiation scientifique.

	CE QUE J'AI AIMÉ FAIRE/VIVRE	CE QUE J'AI MOINS APPRÉCIÉ
DURANT LA THÈSE	<ul style="list-style-type: none"> - Relever des défis scientifiques - La maîtrise de l'ensemble de la chaîne de production - Production scientifique efficace et utile - La liberté de travail 	<ul style="list-style-type: none"> - Travailler de manière « isolée » - Mener un projet non-utilisable par la suite - La non finalisation de certaines phases du projet (outils de mesure clé en main, modèle opérationnel, interfaces utilisateurs...)
	CE QUE JE SOUHAITERAIS FAIRE	CE QUE JE PRÉFÉRERAI NE PAS FAIRE
VIE PROFESSIONNELLE	<ul style="list-style-type: none"> - La recherche appliquée - Avoir les moyens d'être compétitif - Finaliser les projets (industrialiser) 	<ul style="list-style-type: none"> - Manager des équipes - Un travail routinier

➡ Carrière Universitaire et de Recherche:

En premier lieu, je suis particulièrement attiré par le milieu de la recherche. Dans ce cadre, je souhaiterais dans la mesure du possible effectuer un post-doc à l'étranger notamment dans des laboratoires aux États-Unis ou au Canada que je recherche actuellement en fonction de mes thématiques de recherches et des publications récentes, mais également par l'intermédiaire d'un colloque international aux États-Unis auquel j'envisage de participer au mois de Décembre. Ainsi, l'objectif scientifique sera de mettre en pratique les techniques développées sur des bassins versants différents et de finaliser la création d'un modèle hydrométéorologique intégré, permettant de modéliser les ressources en eaux et les crues, constituant alors un outil d'aide à la décision pour les acteurs locaux.

Dans ce contexte, il m'est possible de candidater probablement dès 2012 au concours d'enseignant chercheur dans des universités et laboratoires plutôt du domaine de la montagne. Pour ce type de poste mes compétences en enseignement pourront être valorisées.

Une seconde perspective de carrière dans le domaine de la recherche est de candidater pour des postes de chargé de recherche ou ingénieur de recherche auprès de différents établissements publics (CNRS, IRD, Cemagref,...).

➡ **Carrière en R&D:**

Le caractère hautement opérationnel et appliqué de mes travaux de recherches peut également me permettre de postuler pour des emplois dans des entreprises possédant un service de recherche et développement en hydrologie. Ainsi, les grands gestionnaire de l'eau peuvent être des employeurs potentiels (EDF, CNR,...).

A l'heure actuelle, j'envisage également, comme cela m'a été proposé, de participer au développement d'une Start-up de création d'outils dédiés à la l'hydrométéorologie, que ce soit en terme d'instruments de mesure, de solutions de modélisation, ou d'outils de gestion des ressources en eau. Ce challenge m'apparaît aujourd'hui particulièrement intéressant compte tenu de mes attentes professionnelles.

➡ **Autre type de carrière:**

Au cours de cette thèse, j'ai pris conscience de mon goût pour la transmission des connaissances, et plus particulièrement la recherche, l'organisation et la présentation des idées à un public de néophyte. Ainsi, j'envisage fortement de rechercher des opportunités d'emploi dans le domaine de la médiation scientifique, notamment dans la création d'expositions ou d'ouvrages de vulgarisation accessible au grand public sur des thématiques scientifiques diverses (montagne, climat, risques naturels, physique,...).

Dans les années futures, il me sera également possible de présenter les concours d'ingénieurs de la fonction publique pour des collectivités ou des services de la fonctions publique (RTM, DRIRE, Agence de l'Eau,...).

De même des bureaux d'études en aménagement, gestion des risques ou des ressources en eaux peuvent constituer une perspective possible.

Enfin, même si cette partie technique du travail de thèse n'a pas été la phase la plus épanouissante, des perspectives d'emploi dans le milieu de la programmation et du développement en informatique sont envisageables.

Conclusions

Au terme de ces 3 années, j'ai acquis des compétences scientifiques poussées dans le domaine de l'hydrologie et de l'instrumentation en montagne. De plus, je maîtrise divers outils de modélisation (java, Fortran,...), et de quantification (SIG,...), et en réalisant un monitorat j'ai développé mes capacités d'enseignement, mais surtout de communication sur des thématiques scientifiques auprès de différents publics. En outre, la gestion intégrale de ce projet de recherche me permet de connaître la plupart des rouages de leurs déroulement, de leur gestion, et me permettra donc de travailler sereinement dans le monde de la recherche ou du développement.

Au niveau personnel, cette expérience a été très enrichissante, puisqu'elle m'a fait prendre conscience pour mon goût de relever des challenges scientifiques, de l'initiation de l'idée jusqu'à la phase de réalisation terminale. Ainsi, j'ai confirmé mon intérêt pour le monde de la recherche dans lequel je souhaiterais continuer d'évoluer à l'avenir.

Liste des Sites iButtons :

1. Ib1-R & Ib1-S : Pré-Marcel (1291 mètres)
2. Ib2-R & Ib2-S : La Blame (1450 mètres)
3. Ib3-R : La Gorges (905 mètres)
4. Ib4-R & Ib4-S : Pré-Long (1400 mètres)
5. Ib5-R : Cabane Pleynet (1350 mètres)
6. Ib6-R & Ib6-S : Arbre-à-coude (1400 mètres)
7. Ib7-R & Ib7-S : Sentier Refuge (1850 mètres)
8. Ib8-R : Le Mollard (-)
9. Ib9-R & Ib9-S : Pierrier Pleynet (1450 mètres)
10. Ib10-R : Station Pleynet (1360 mètres)
11. Ib11-R : Feuillu pierrier (1450 mètres)
12. Ib12-R : Refuge Jean-Collet (1950 mètres)
13. Ib13-R & Ib13-S : Sapin pierrier (1580 mètres)
14. Ib14-R : Station Refuge (2060 mètres)
15. Ib15-R & Ib15-S : Falaise Mousset (1750 mètres)
16. Ib16-R & Ib16-S : Sapin Habert (1680 mètres)
17. Ib17-R & Ib17-S : Falaise ouest (1800 mètres)
18. Ib18-R & Ib18-S : Falaise haute (1900 mètres)
19. Ib19-R : Appareil Lac (2350 mètres)
20. Ib20-R & Ib20-S : Rocher du diable (2200 mètres)
21. Ib21-R : Station Lac (2230 mètres)
22. Ib22-R & Ib22-S : Glacier (2450 mètres)
23. Ib23-R : Sentier supérieur (2190 mètres)

Ibutton N°1:

Pré Marcel**Lieu: Parking Pré-Marcel**

Altitude: 1290 mètres

Position: X= 884 150m , Y= 2 031 000m

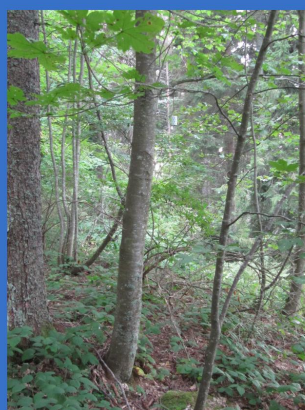
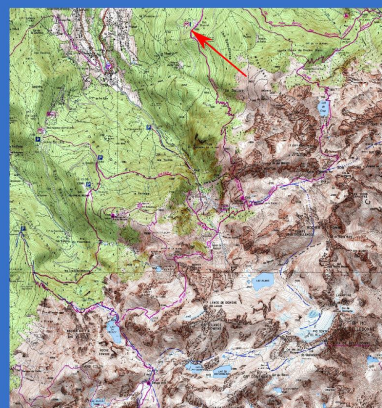
Installation: 10-09-2009

 Δt : 1h

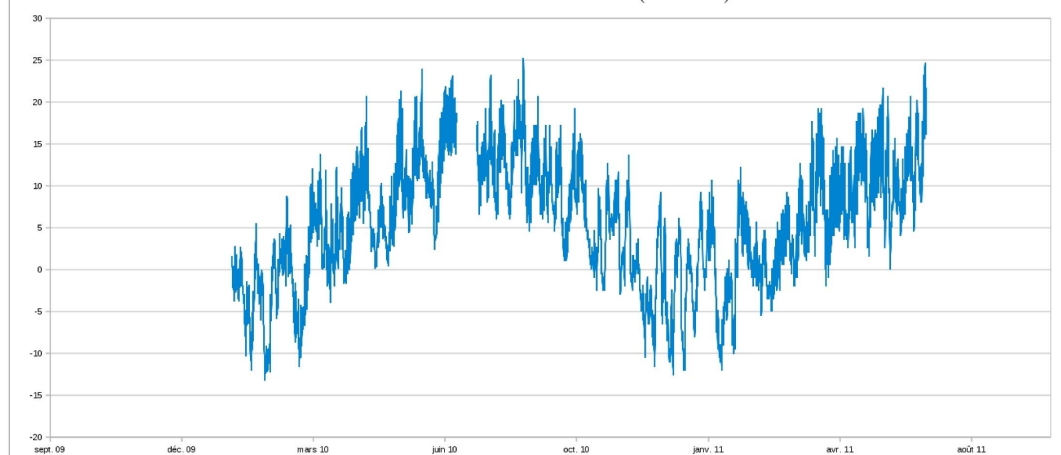
Résolution: - 0,065°C

- 0,5°C (à partir du 06/07/2010)

--> Données manquantes: du 01/09/10 au 17/01/10



TEMPÉRATURE PRÉ-MARCEL (IB1-Air)



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°1: Pré-marcel parking**Lieu: Pré-Marcel (parking)**

Altitude: 1290 mètres

Position: X= 884 150m , Y= 2 031 000m

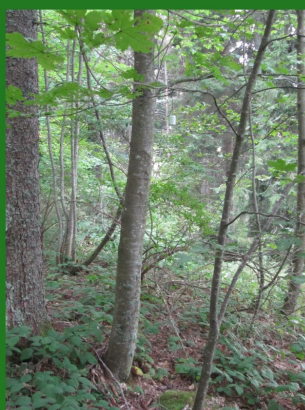
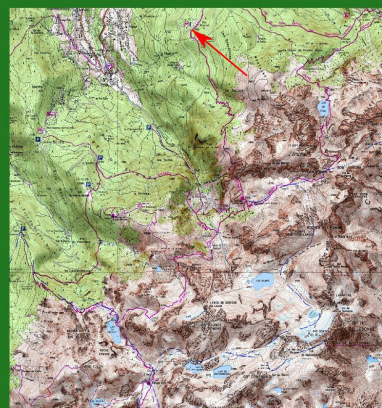
Installation: 10-09-2009

 Δt : 1h

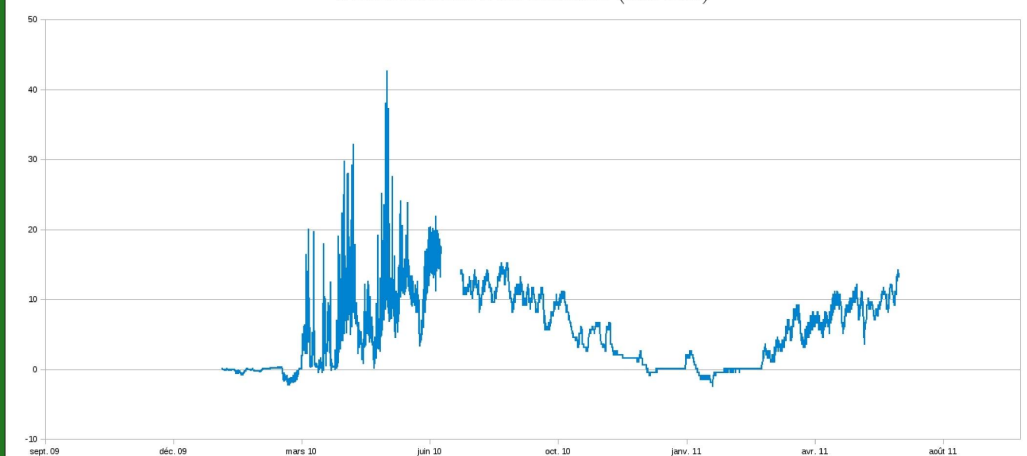
Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 06/07/10)

-0,5°C (depuis le 06/07/10)

--> Données manquantes: du 10/09/09 au 17/01/10



TEMPÉRATURE PRÉ-MARCEL (IB1-SOL)



Ibutton N°2:

La Blame**Lieu: La Blame (Foret)**

Altitude: 1400 mètres

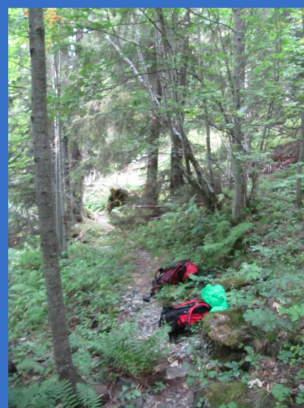
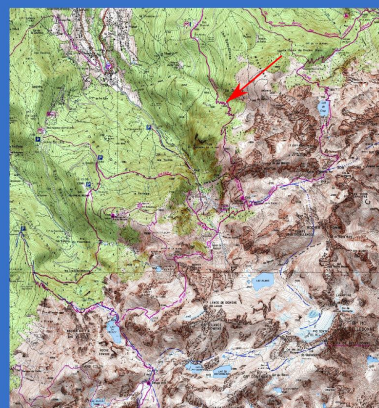
Position: X= 883 630m , Y= 2 029 160m

Installation: 10-09-2009

 Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C

--> Données manquantes: __

*Volé !*

CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°2: **La Balme****Lieu: La Balme**

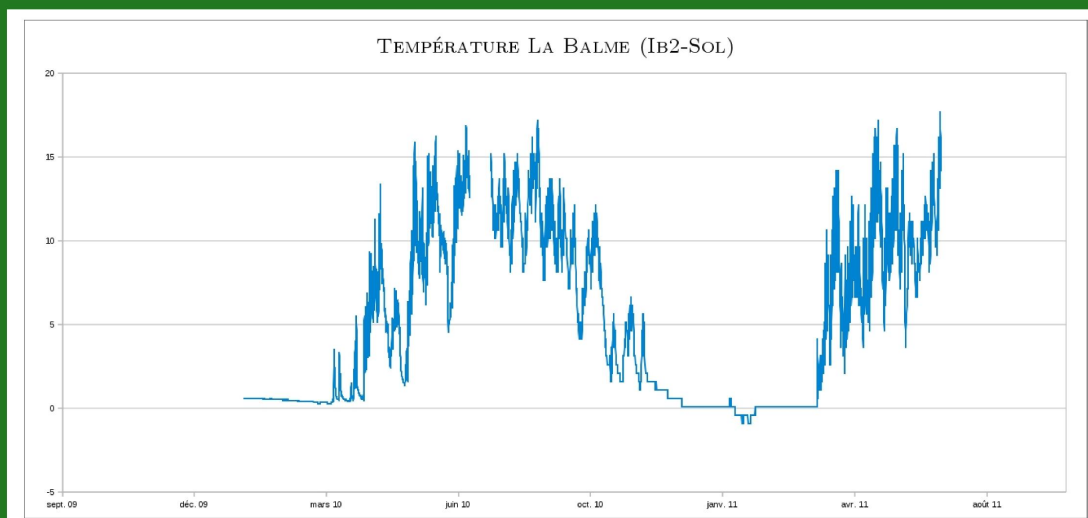
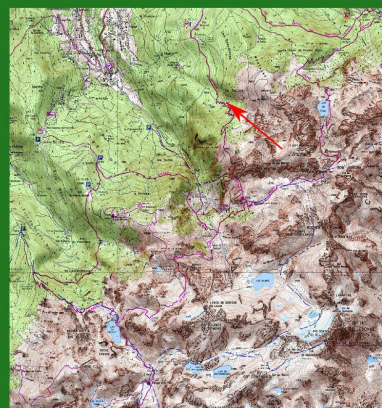
Altitude: 1450 mètres

Position: X= 883 630m , Y= 2 029 160m

Installation: 10-09-2009

 Δt : 1hRésolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 06/07/10)
-0,5°C (depuis le 06/07/10)

--> Données manquantes: du 10/09/09 au 17/01/10



Ibutton N°3: Parking La Gorge

Lieu: Parking de la Gorge

Altitude: 900 mètres

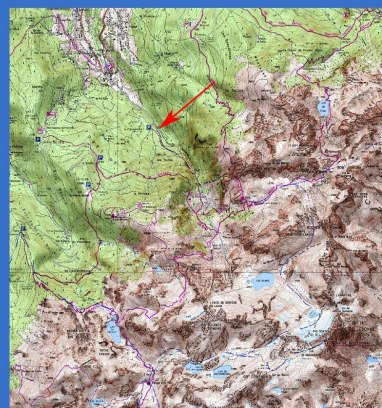
Position: X= 883 630m , Y= 2 029 160m

Installation: 10-09-2009

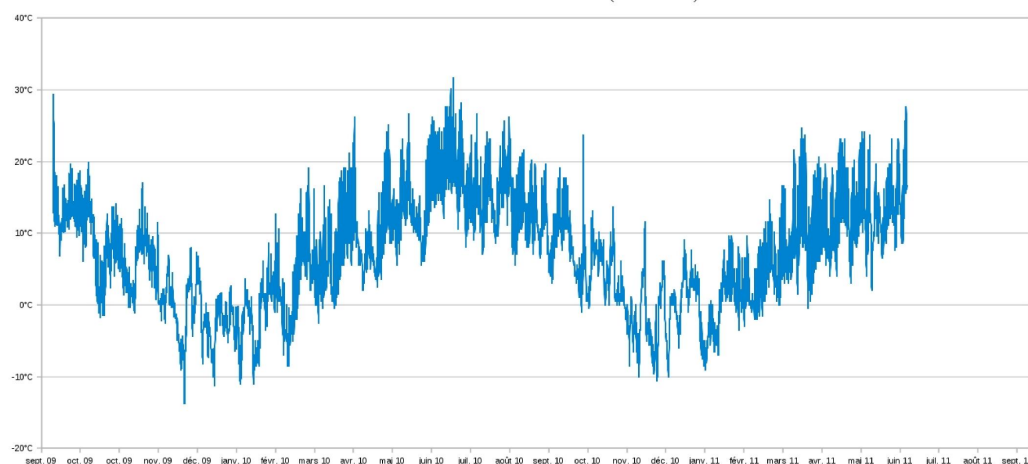
Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)
- 0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: 2h le 2 Février 2010



TEMPÉRATURE LA GORGE (IB3-Air)



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°4: Pré-Long Parking**Lieu: Pré-Long (parking)**

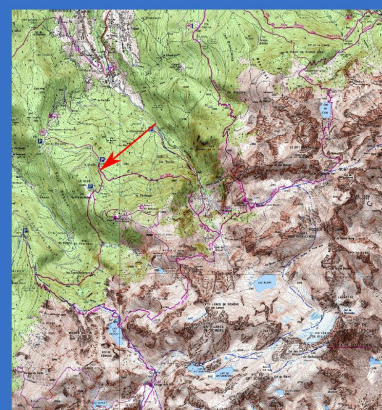
Altitude: 1375 mètres

Position: X= 882 485m , Y= 2 028 330m

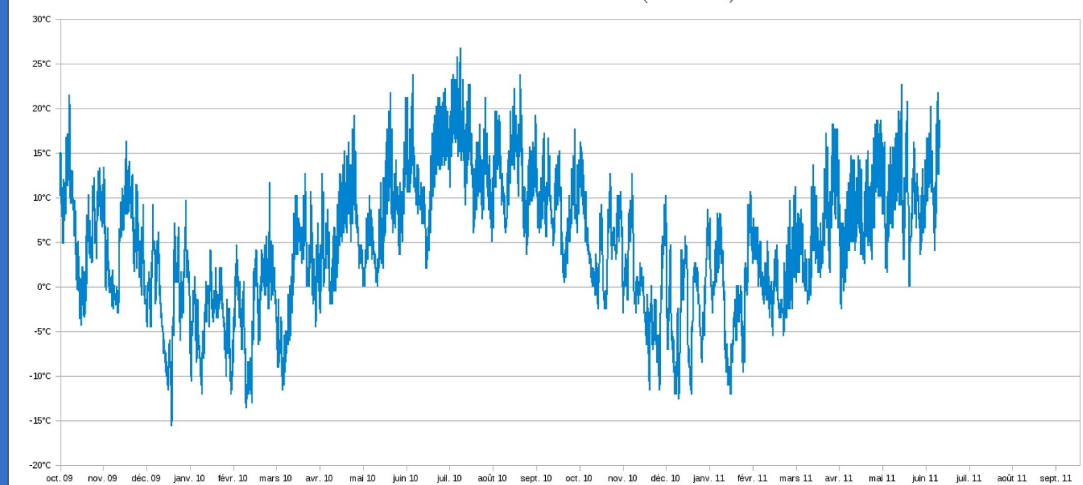
Installation: 10-09-2009

 Δt : 1hRésolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)
-0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: __



TEMPÉRATURE PRÉ-LONG (IB4-AIR)



Ibutton N°4: Pré-Long parking

Lieu: Pré-long (parking)

Altitude: 1375 mètres

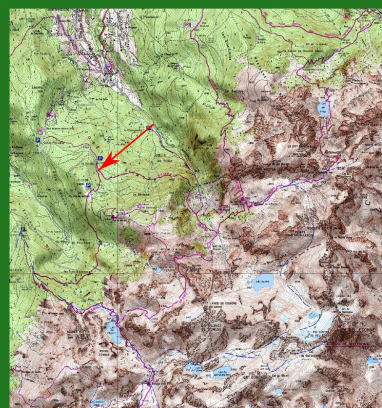
Position: X= 882 485m , Y= 2 028 330m

Installation: 10-09-2009

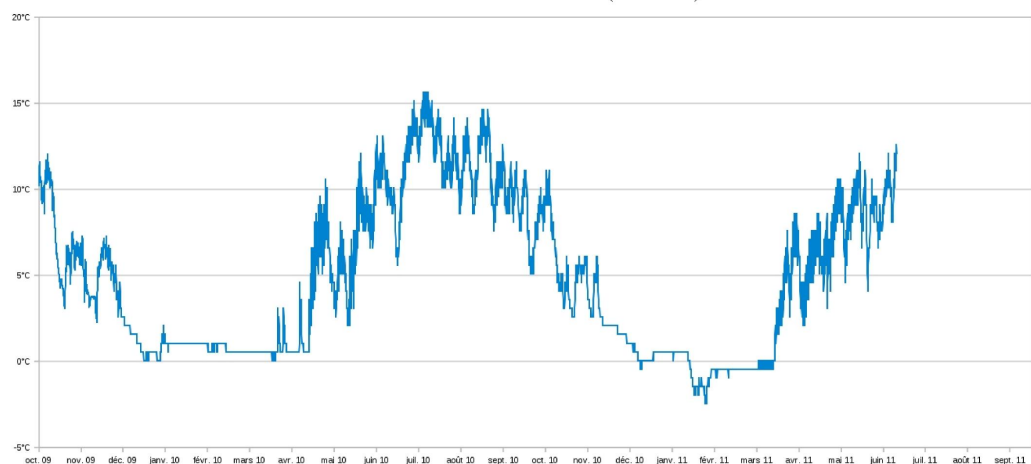
Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)
-0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: __



TEMPÉRATURE PRÉ-LONG (IB4-SOL)



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°5: Cabane du Pleynet**Lieu: Cabane du Pleynet**

Altitude: 1248 mètres

Position: X= 884 360m , Y= 2 028 350m

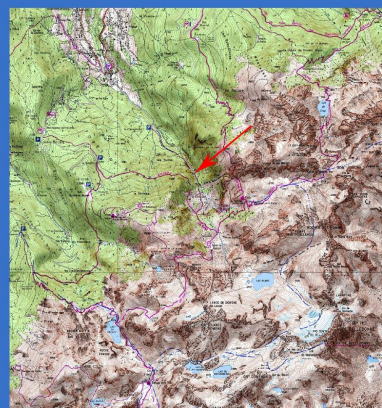
Installation: 4-12-2008

 Δt : 1h et 2h (entre le 7-Oct-09 et le 2-Fev-10)

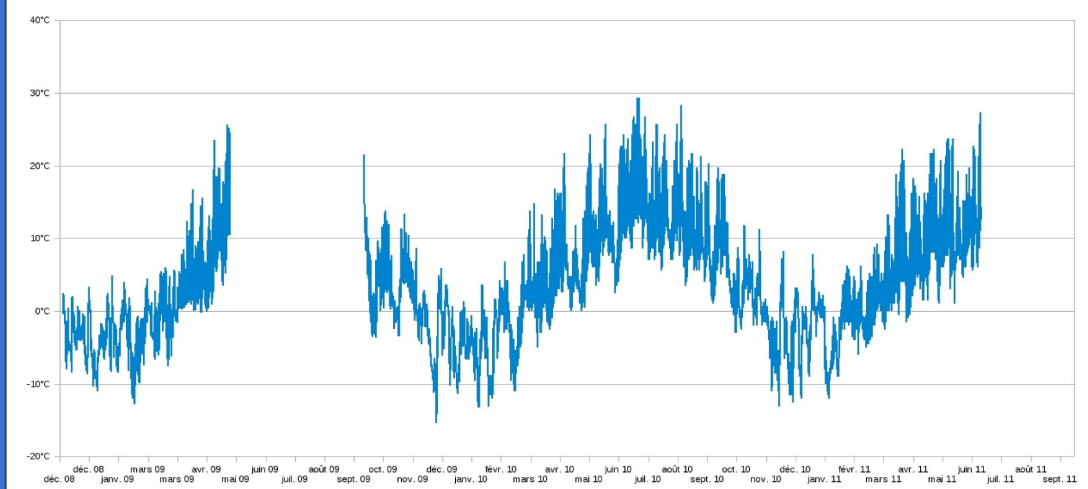
Résolution: - 0,065°C (du 04/12/08 au 02/02/10)

- 0,5°C (depuis le 02/02/10)

--> Données manquantes: Du 23/05/09 au 07/10/09



TEMPÉRATURE CABANE DU PLEYNET



Ibutton N°6: **Arbre à Coude**

Lieu: Arbre à coude (Chemin Pleynet)

Altitude: 1400 mètres

Position: X= 884 240m , Y= 2 028 175m

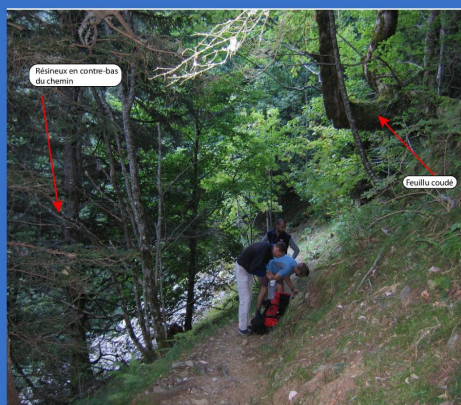
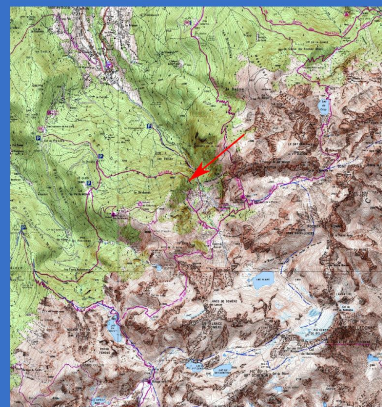
Installation: 10-09-2009

Δt : 1h

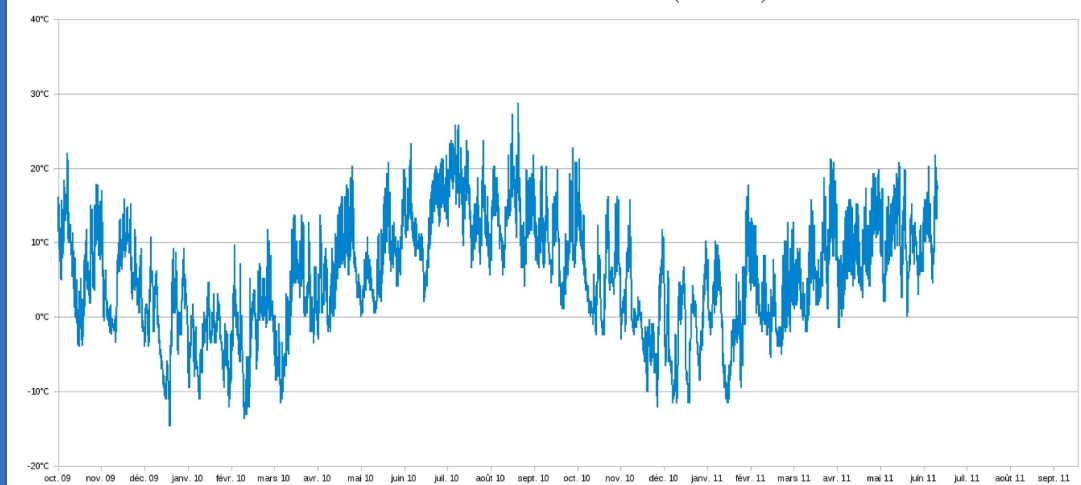
Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)

-0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: __



TEMPÉRATURE ARBRE A COUDE (IB6-Air)



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°6: Arbre à Coude**Lieu: Arbre à Coude (Chemin Pleynet)**

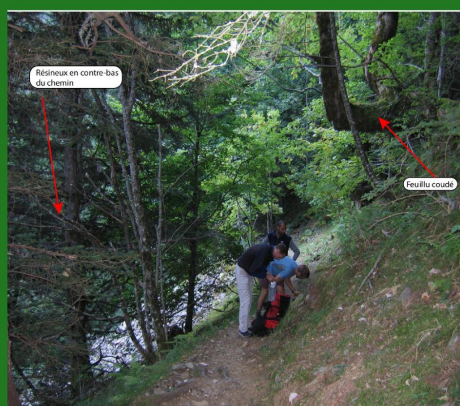
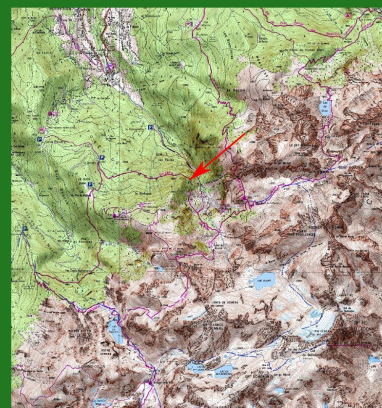
Altitude: 1400 mètres

Position: X= 884 240m , Y= 2 028 175m

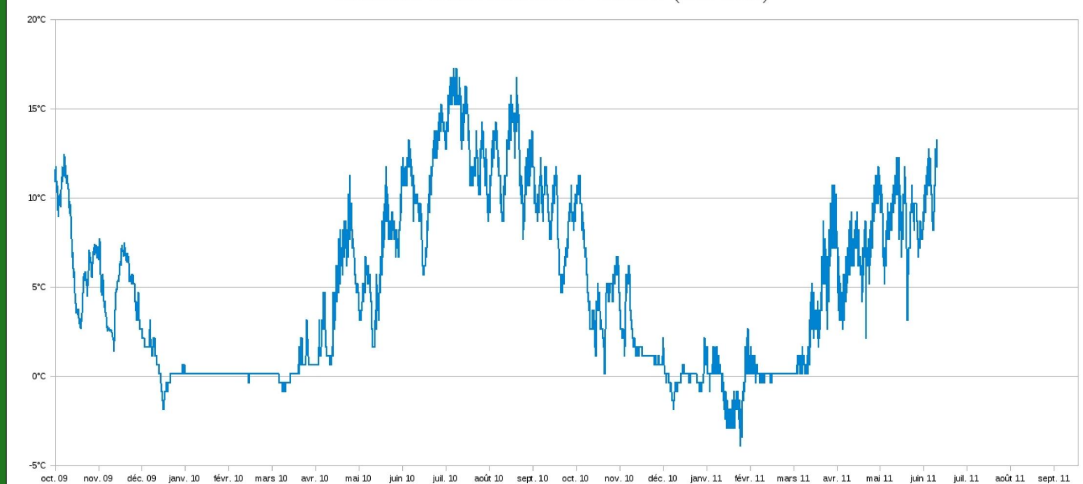
Installation: 10-09-2009

 Δt : 1hRésolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)
-0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: __



TEMPÉRATURE ARBRE A COUDE (IB6-SOL)



Ibutton N°7: Sentier Refuge

Lieu: Sentier Refuge

Altitude: 1895 mètres

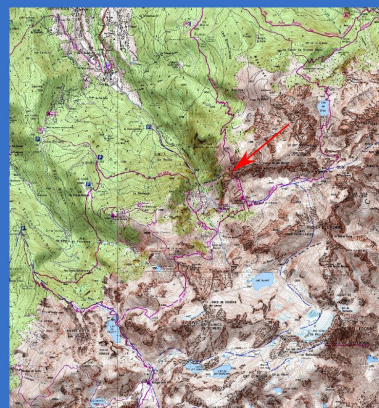
Position: X= 885 120m , Y= 2 028 460m

Installation: 10-09-2009

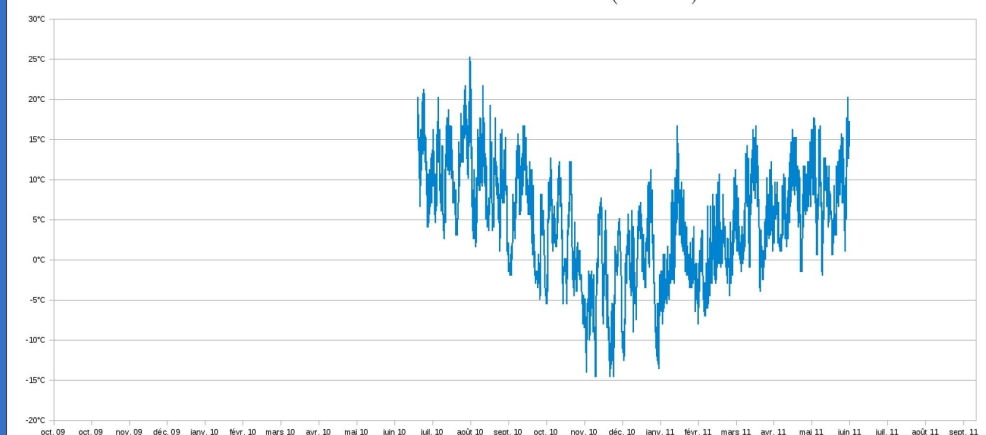
Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au ...)

--> Données manquantes: Volé au 27 Mai 2010
(remplacé)



TEMPÉRATURE SENTIER REFUGE (IB7-AIR)



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°7: Sentier Refuge**Lieu: Sentier Refuge**

Altitude: 1895 mètres

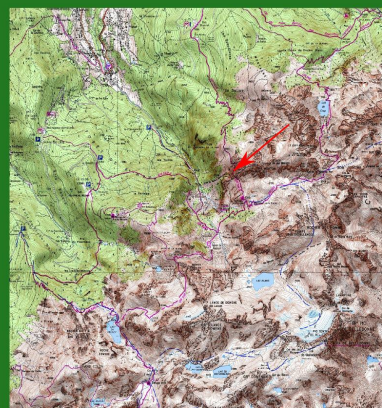
Position: X= 885 120m , Y= 2 028 460m

Installation: 10-09-2009

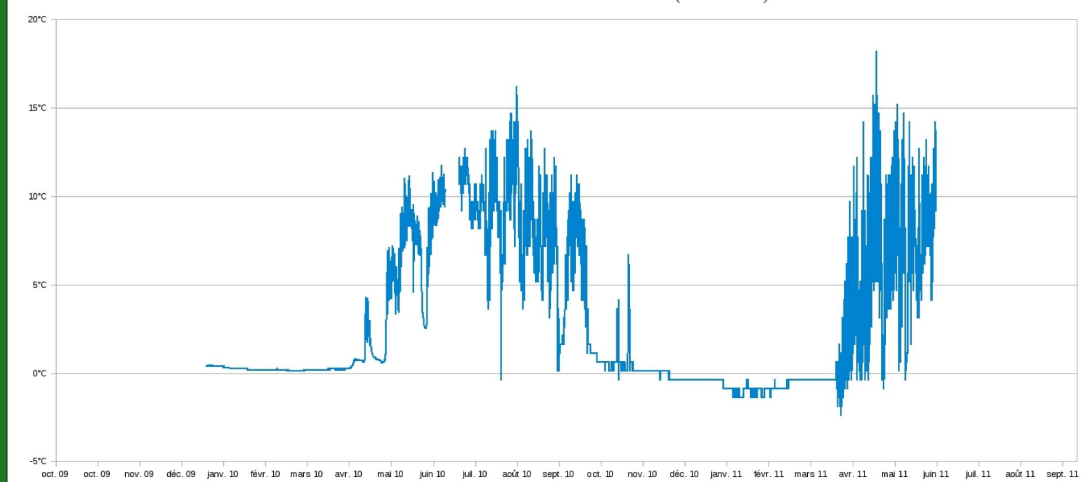
 Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au ...)

--> Données manquantes: __



TEMPÉRATURE SENTIER REFUGE (Ib7-SOL)



Ibutton N°8: Refuge du Mollard**Lieu: Refuge du Mollard**

Altitude: 1735 mètres

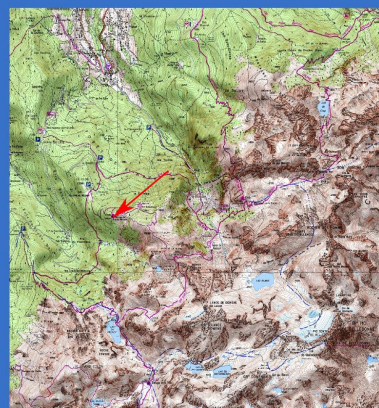
Position: X= 882 800m , Y= 2 027 460m

Installation: Non-installé

 Δt : _

Résolution: _

--> Données manquantes: _

*Non-Installé*

CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°9: Pierrier Pleynet**Lieu: Pierrier Pleynet (chemin Refuge)**

Altitude: 1475 mètres

Position: X= 884 300m , Y= 2 027 685m

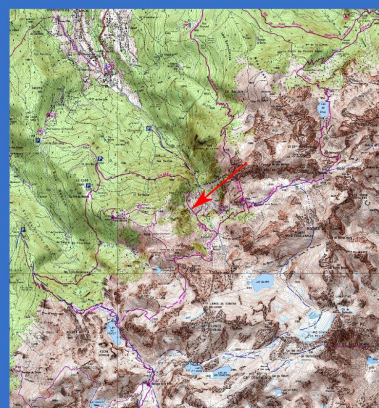
Installation: 10-09-2009

 Δt : 1h

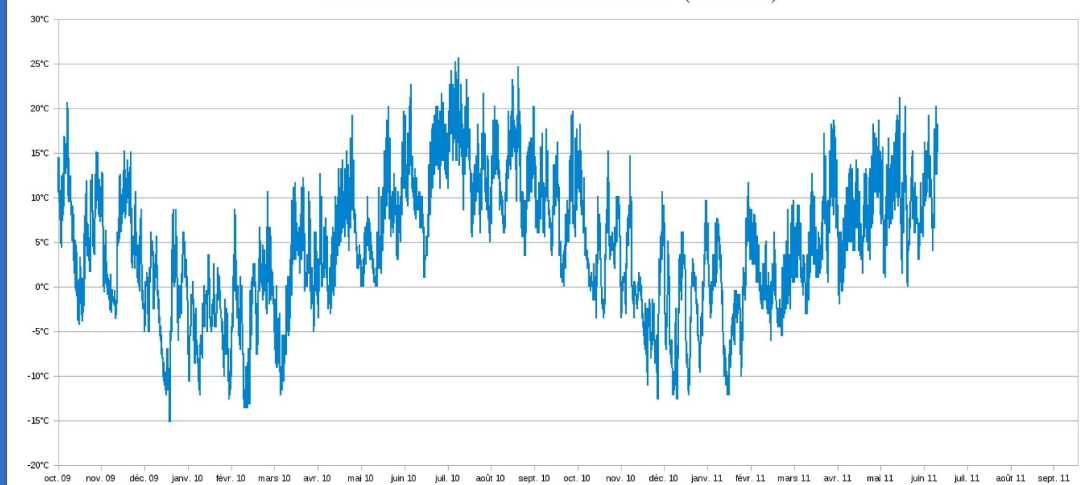
Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)

- 0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: _



TEMPÉRATURE PIERRIER PLEYNET (IB9-AIR)



Ibutton N°9: Pierrier Pleynet

Lieu: Pierrier Pleynet (Sentier Refuge)

Altitude: 1475 mètres

Position: X= 884 300m , Y= 2 027 685m

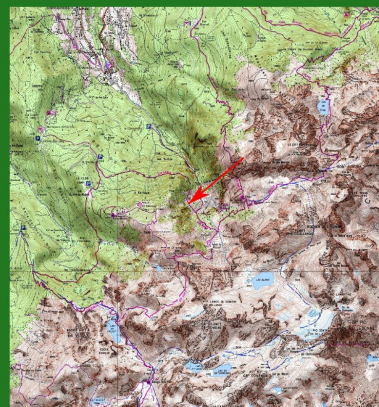
Installation: 10-09-2009

Δt : 1h

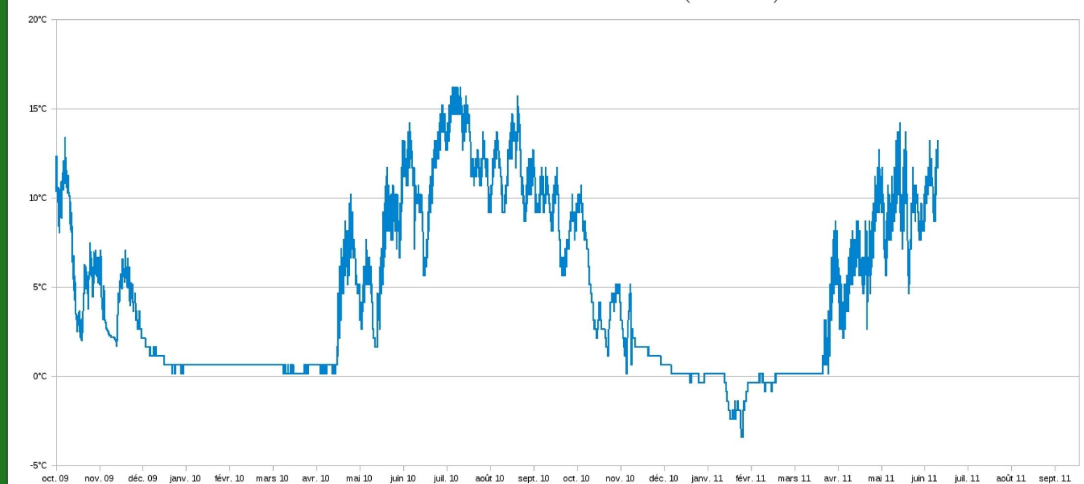
Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)

- 0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: _



TEMPÉRATURE PIERRIER PLEYNET (IB9-SOL)



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°10: Station du Pleynet**Lieu: Station du Pleynet**

Altitude: 1375 mètres

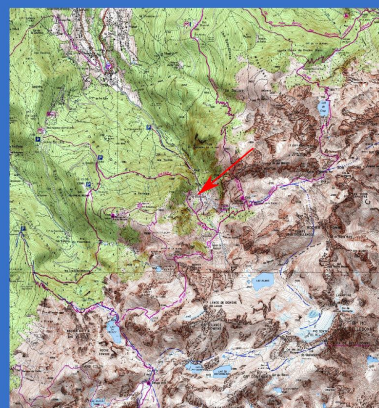
Position: X= 884 440m , Y= 2 028 000m

Installation: 7-10-2009

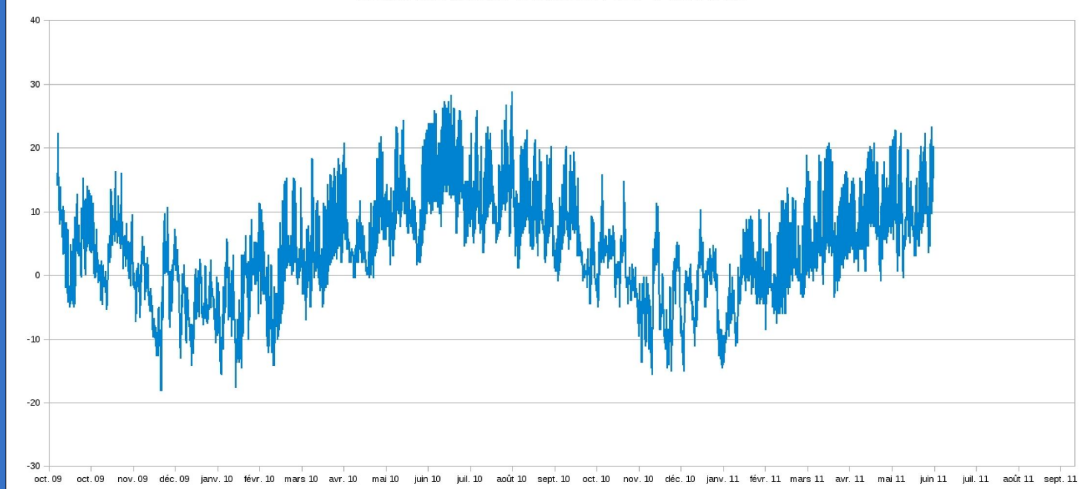
 Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C

--> Données manquantes: __



TEMPÉRATURE STATION DU PLEYNET



Ibutton N°11: Feuillu Pierrier

Lieu: Feuillu Pierrier (Cabane Pleynet)

Altitude: 1450 mètres

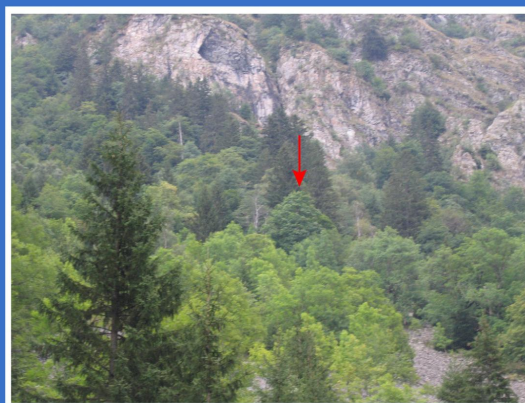
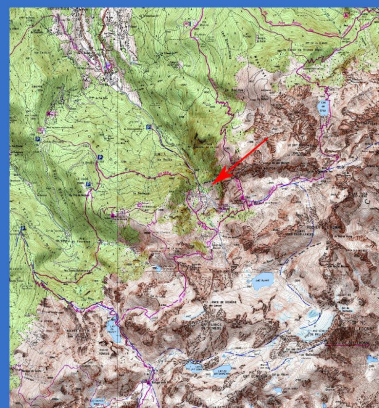
Position: X= 884 700m , Y= 2 028 150m

Installation: 10-09-2009

Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au ...)

--> Données manquantes: __



*Pas de données disponibles
en Juillet 2011*

CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°12: Refuge Jean Collet**Lieu: Refuge Jean Collet**

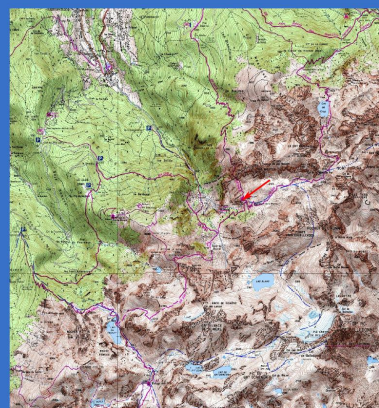
Altitude: 1950 mètres

Position: X= 885 280m , Y= 2 027 900m

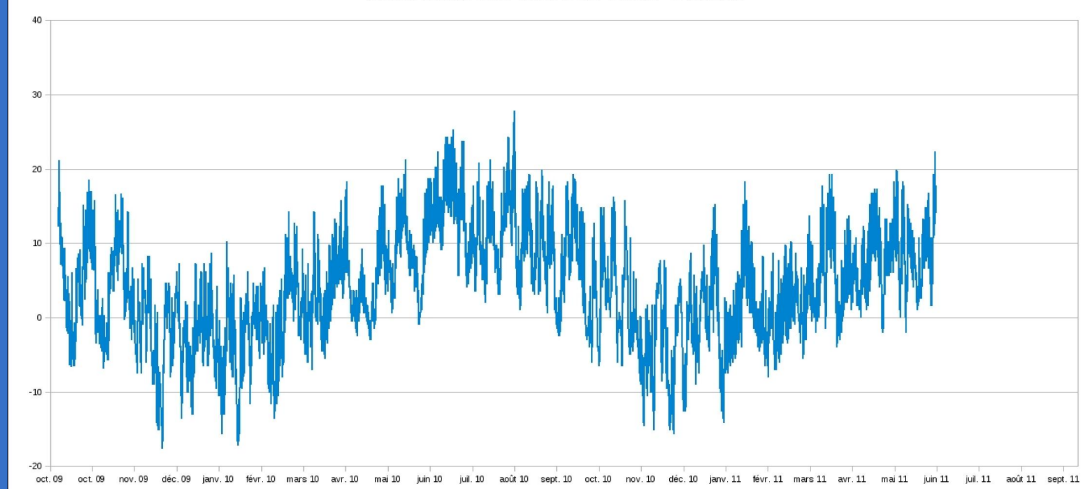
Installation: 7-10-2009

 Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C

--> Données manquantes: 1h le 24 Novembre 2009
attention changement H

TEMPÉRATURE REFUGE JEAN COLLET



Ibutton N°13: Pierrier Refuge

Lieu: Pierrier Refuge

Altitude: 1475 mètres

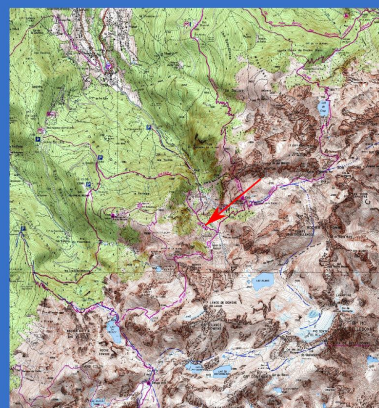
Position: X= 884 570m , Y= 2 027 400m

Installation: 10-09-2009

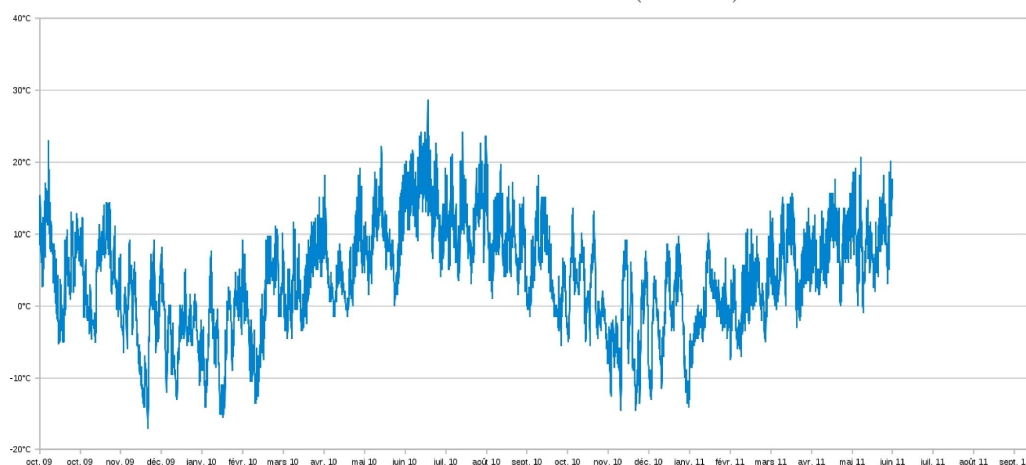
Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C

--> Données manquantes: 5h (el 24/11/10)
Attention changement H



TEMPÉRATURE PIERRIER REFUGE (IB13-Air)



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°13: Pierrier Refuge**Lieu: Pierrier Refuge**

Altitude: 1475 mètres

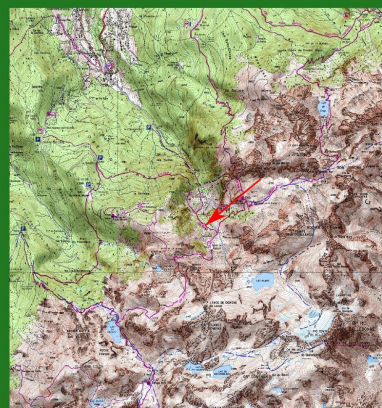
Position: X= 884 570m , Y= 2 027 400m

Installation: 10-09-2009

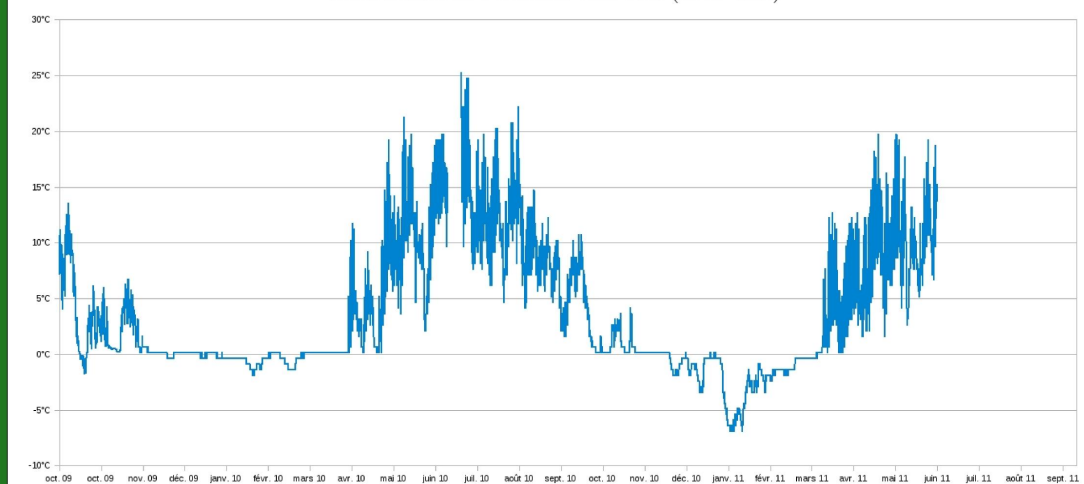
 Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C

--> Données manquantes: 5h (el 24/11/10)
Du 06/07/10 au 16/07/11



TEMPÉRATURE PIERRIER REFUGE (IB13-SOL)



Ibutton N°14: Station du Refuge

Lieu: Station du Refuge

Altitude: 2050 mètres

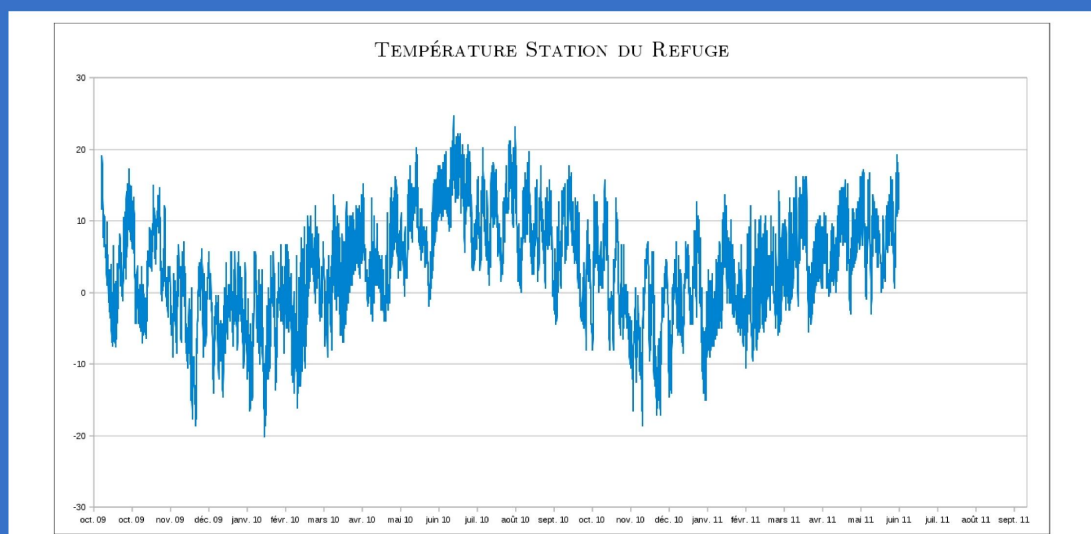
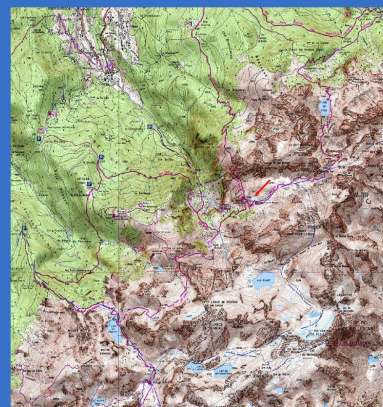
Position: X= 885 500m , Y= 2 027 965m

Installation: 7-10-2009

Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C

--> Données manquantes: 3h le 24 Novembre 2009
attention changement H



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°15: Falaise Mousset**Lieu: Falaise Mousset**

Altitude: 1750 mètres

Position: X= 885 020m , Y= 2 027 300m

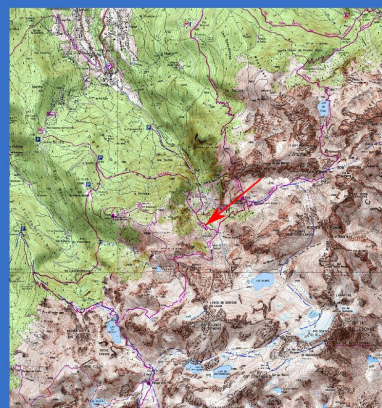
Installation: 10-09-2009

 Δt : 1h

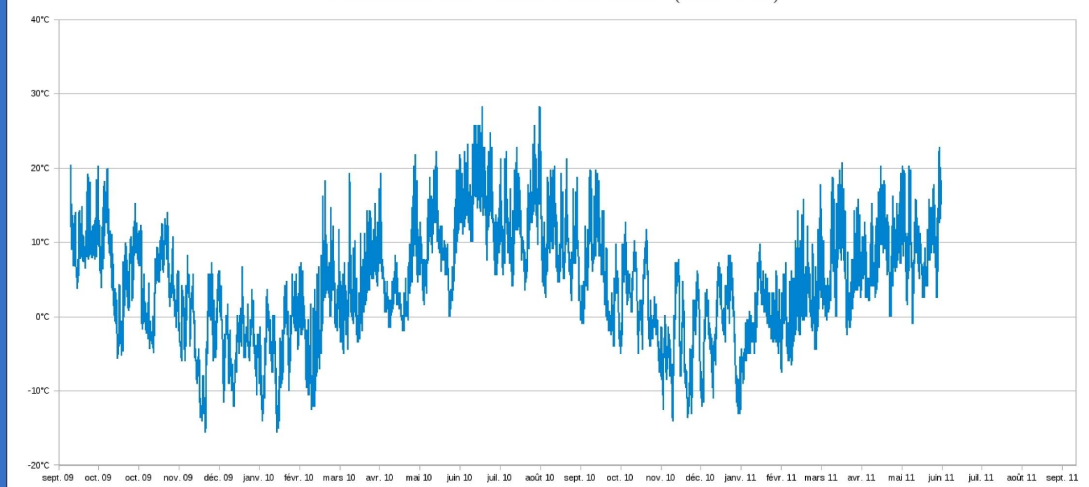
Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)

- 0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: _



TEMPÉRATURE FALAISE MOUSSET (IB15-AIR)



Ibutton N°15: Falaise Mousset

Lieu: Falaise Mousset

Altitude: 1750 mètres

Position: X= 885 020m , Y= 2 027 300m

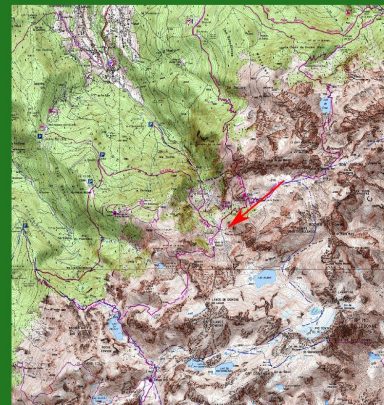
Installation: 10-09-2009

Δt : 1h

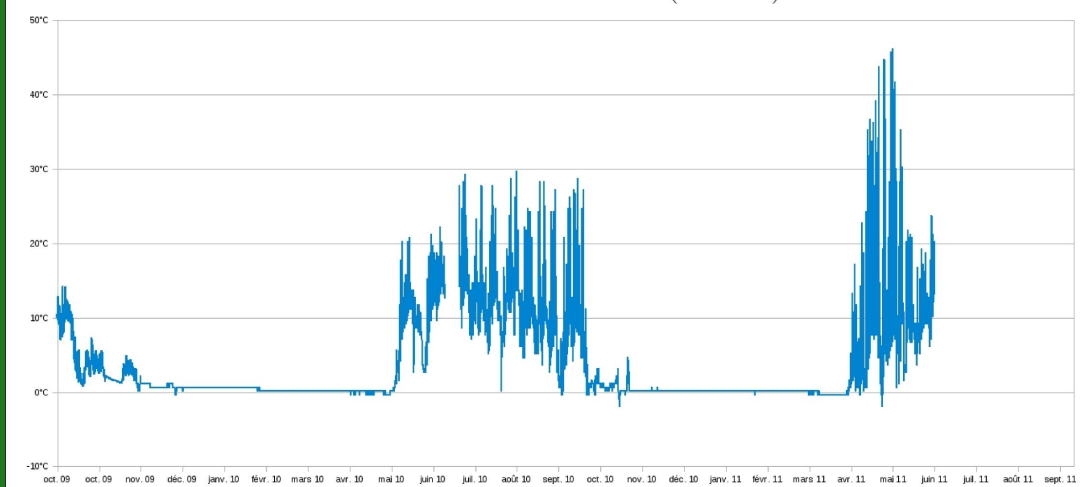
Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)

- 0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: 7h (le 24/11/10)
du 06/07/10 au 16/07/10



TEMPÉRATURE FALAISE MOUSSET (Ib15-Sol)



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°16: **Sapin Habert****Lieu: Sapin du Habert**

Altitude: 1700 mètres

Position: X= 884 850m , Y= 2 027 150m

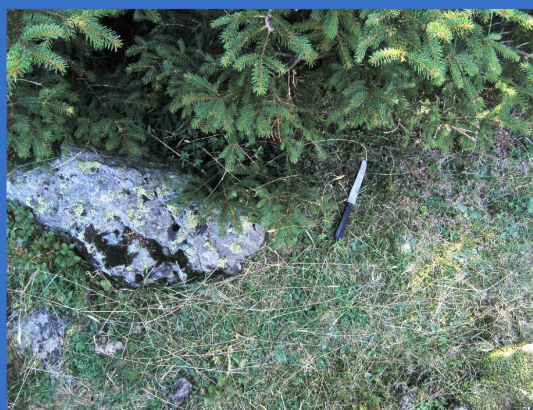
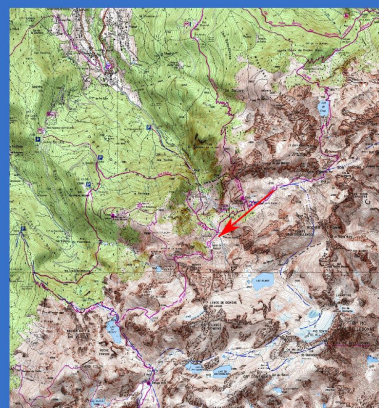
Installation: 10-09-2009

 Δt : 1h

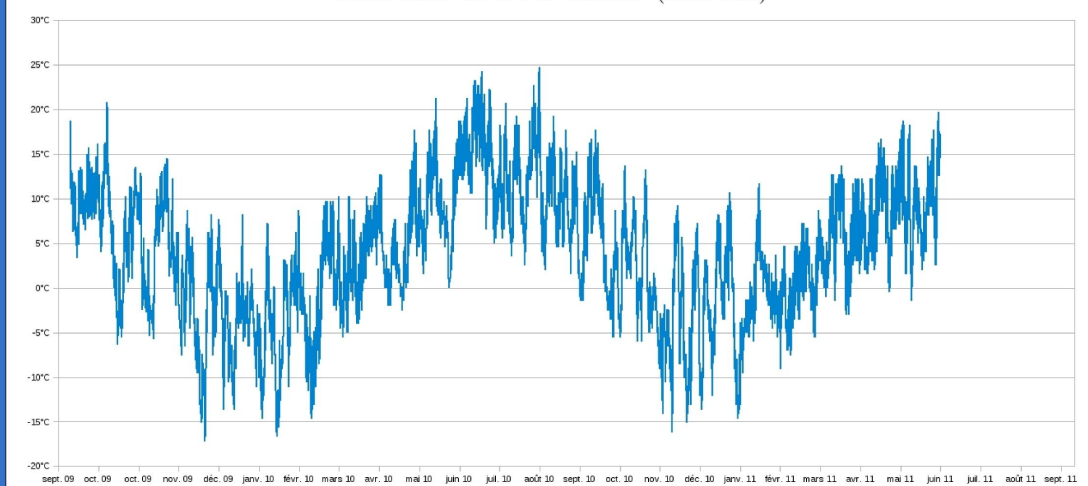
Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)

- 0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: 7h le 24 Novembre 2009



TEMPÉRATURE SAPIN HABERT (Ib16-Air)



Ibutton N°16: Sapin Mousset

Lieu: Sapin Mousset

Altitude: 1700 mètres

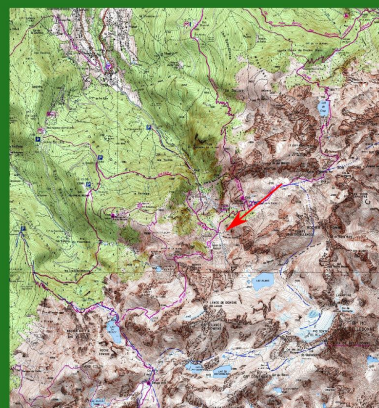
Position: X= 884 850m , Y= 2 027 150m

Installation: 10-09-2009

Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 22/06/2011)
- 0,5°C (depuis le 22/06/2011)

--> Données manquantes: Pas de données avant
le 03/01/2011



TEMPÉRATURE SAPIN HABERT (IB16-SOL)



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°17: Falaise Ouest**Lieu: Falaise ouest**

Altitude: 1750 mètres

Position: X= 884 665m , Y= 2 026 885m

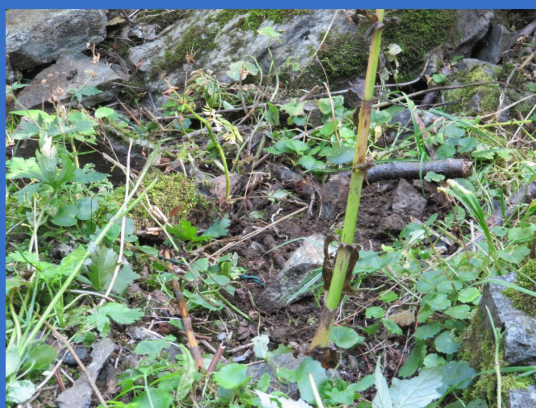
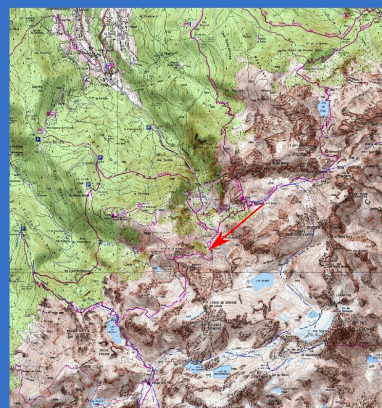
Installation: 10-09-2009

 Δt : 1h

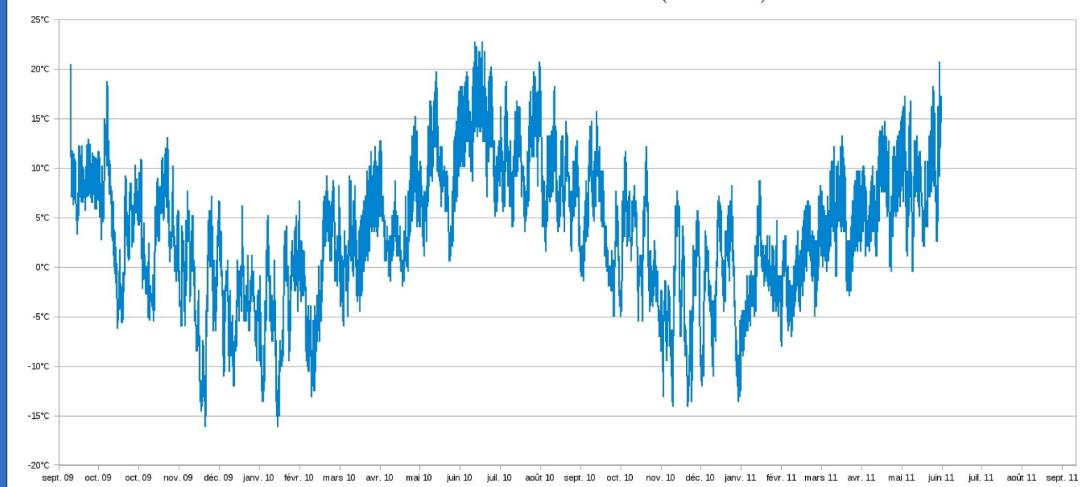
Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)

- 0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: __



TEMPÉRATURE FALAISE OUEST (Ib17-Air)



Ibutton N°17: Falaise Ouest

Lieu: Falaise Ouest

Altitude: 1750 mètres

Position: X= 884 665m , Y= 2 026 885m

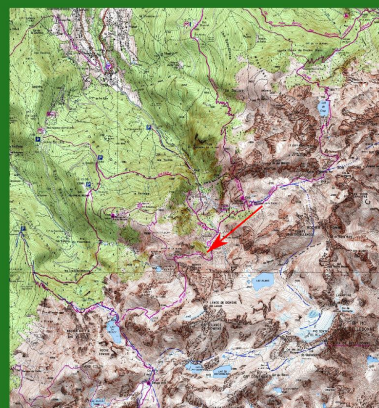
Installation: 10-09-2009

Δt : 1h

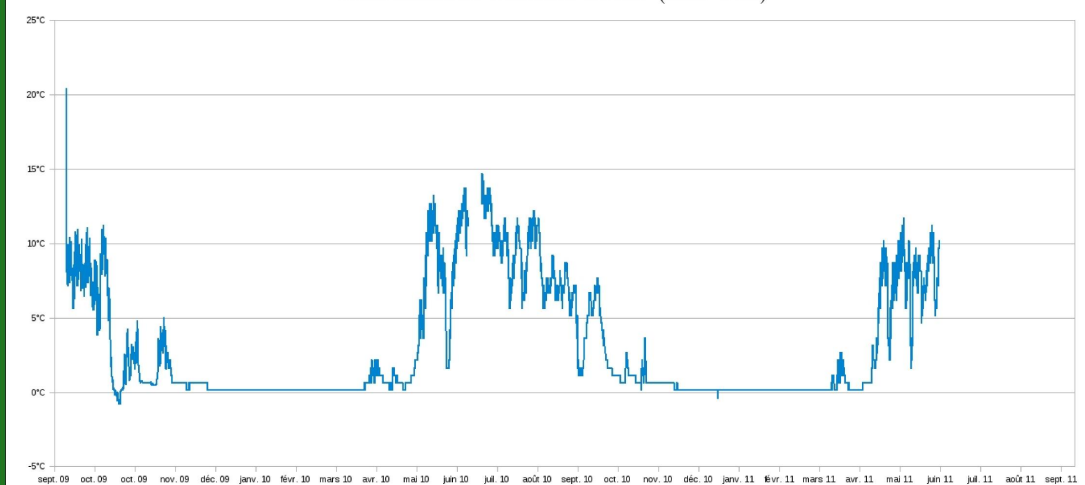
Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)

- 0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: _



TEMPÉRATURE FALAISE OUEST (IB17-SOL)



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°18: Falaise Haute**Lieu: Falaise Haute**

Altitude: 1900 mètres

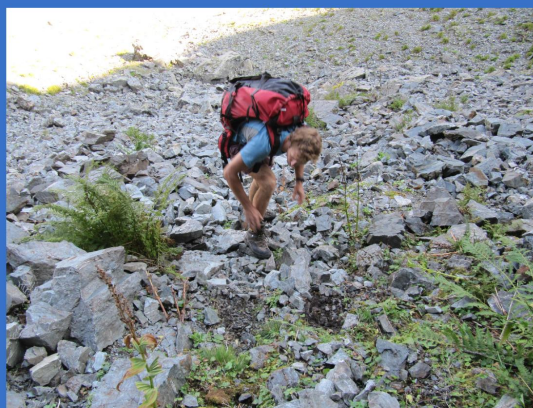
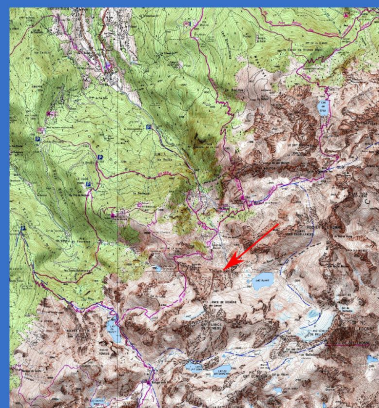
Position: X= 884 950m , Y= 2 026 530m

Installation: 10-09-2009

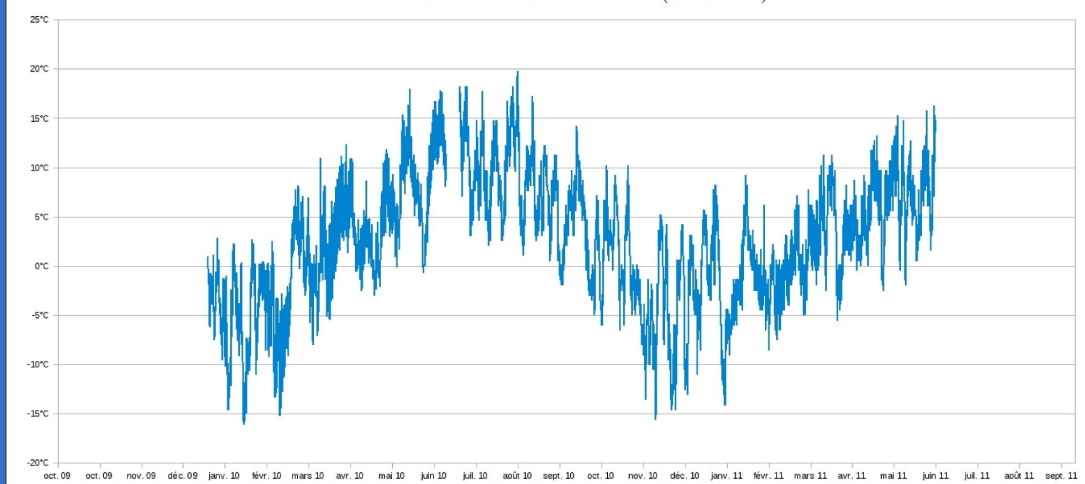
 Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au ...)

--> Données manquantes: __



TEMPÉRATURE FALAISE HAUTE (Ib18-Air)



Ibutton N°18: Falaise Haute

Lieu: Falaise Haute

Altitude: 1900 mètres

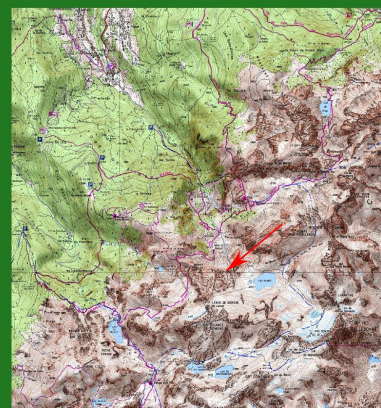
Position: X= 884 950m , Y= 2 026 530m

Installation: 10-09-2009

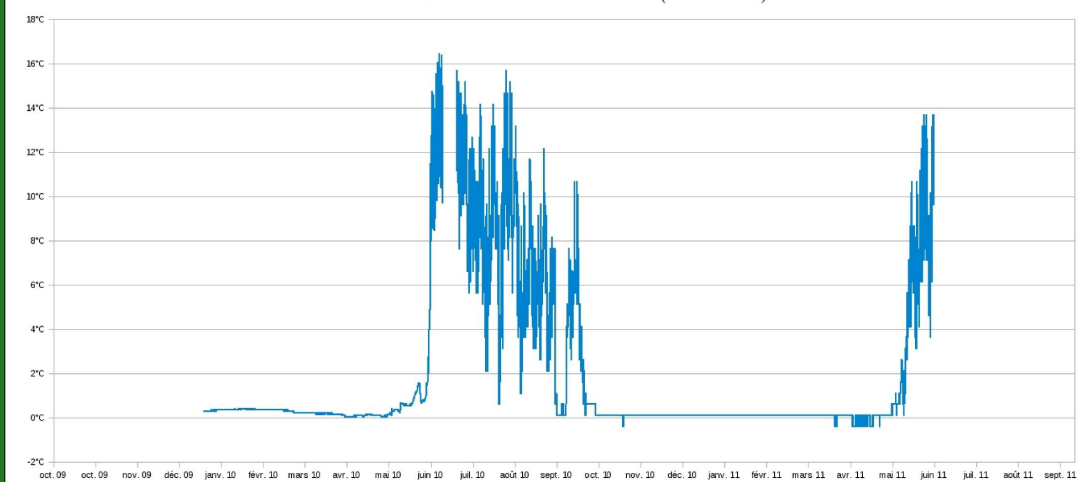
Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au ...)

--> Données manquantes: __



TEMPÉRATURE FALAISE HAUTE (IB18-SOL)



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°19: Appareil Lac Blanc**Lieu: Appareil photos lac Blanc**

Altitude: 2300 mètres

Position: X= 885 830m , Y= 2 026 890m

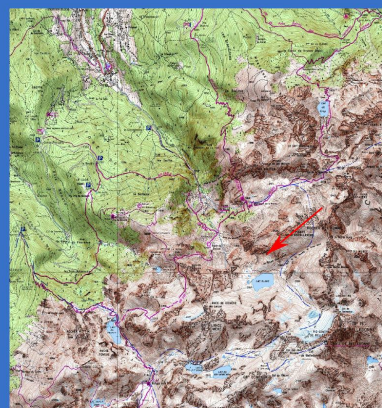
Installation: 07-10-2009

 Δt : 1h

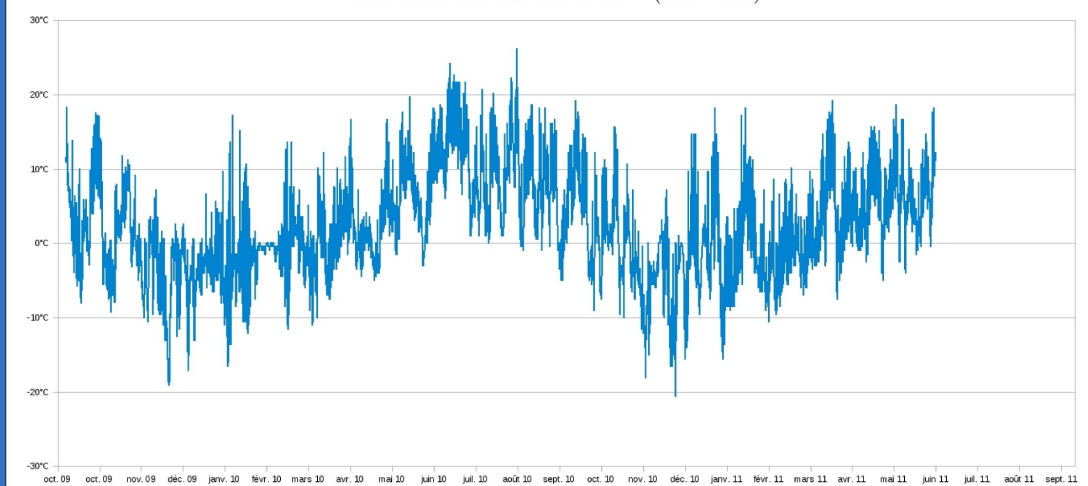
Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)

- 0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: 5h le 24 Novembre 2010



TEMPÉRATURE APPAREIL LAC (IB19-Air)



Ibutton N°20: **Rocher du Diable**

Lieu: Rocher du diable

Altitude: 2200 mètres

Position: X= 885 700m , Y= 2 026 560m

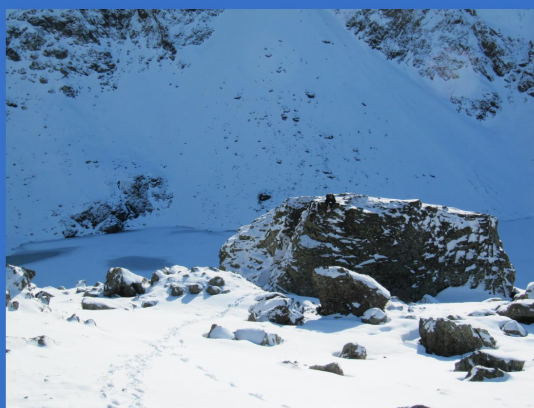
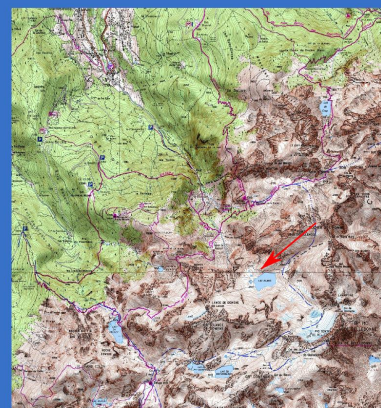
Installation: 8-09-2009

Δt : 1h

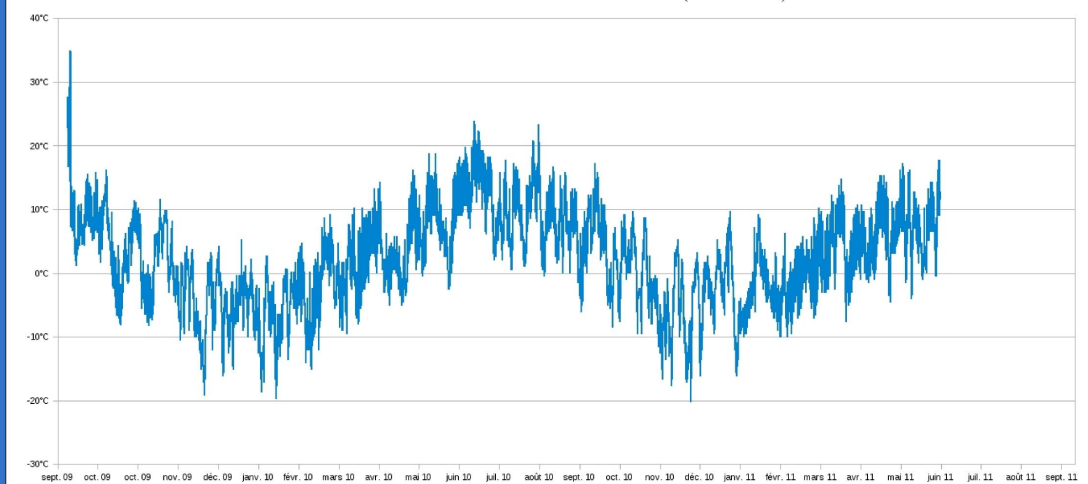
Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 24/11/09)

- 0,5°C (depuis le 24/11/09)

--> Données manquantes: 6h le 24 Novembre 2009



TEMPÉRATURE ROCHER DU DIABLE (Ib20-AIR)



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°20: Rocher du Diable**Lieu: Rocher du Diable**

Altitude: 2200 mètres

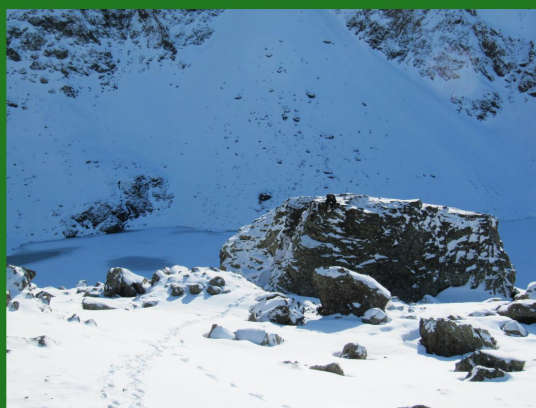
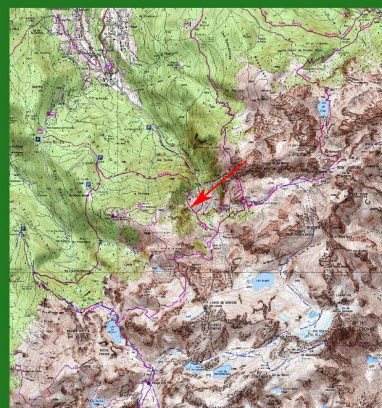
Position: X= 885 700m , Y= 2 026 560m

Installation: 10-09-2009

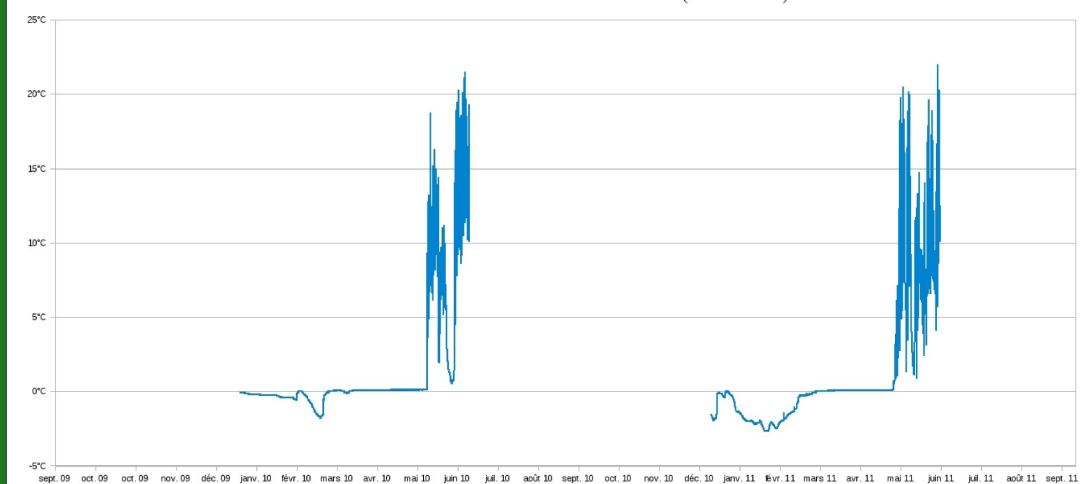
 Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au 06/07/10)

- 0,5°C (depuis le 06/07/10)

--> Données manquantes: jusqu'au 16/01/2010
Du 06/07/10 au 03/01/11

TEMPÉRATURE ROCHER DU DIABLE (Ib20-SOL)



Ibutton N°21: Station du Lac Blanc

Lieu: Station du Lac Blanc

Altitude: 2230 mètres

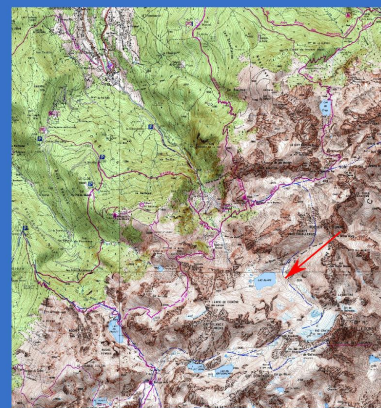
Position: X= 886 100m , Y= 2 026 500m

Installation: 7-10-2009

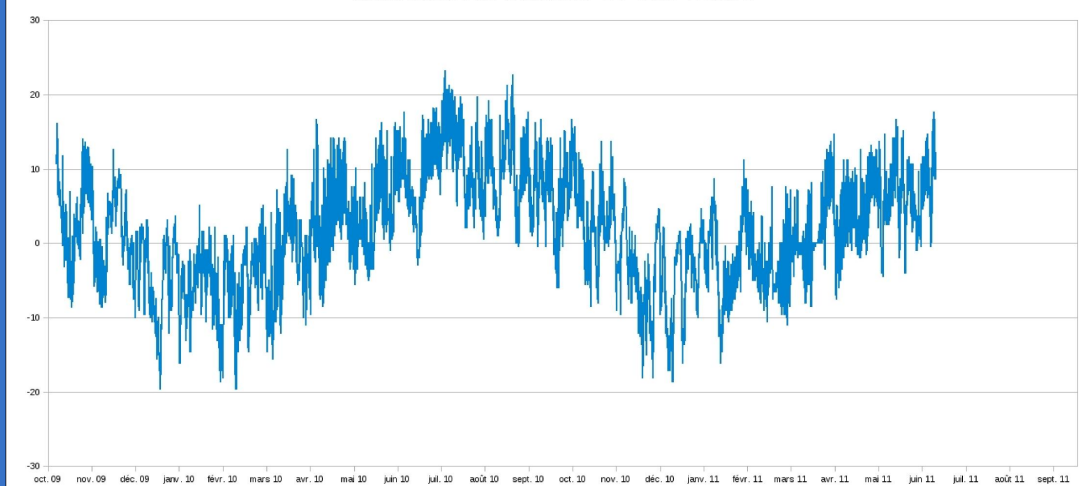
Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C

--> Données manquantes: 4h le 24 Novembre 2009
attention changement H



TEMPÉRATURE STATION DU LAC BLANC



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°22:

Glacier**Lieu: Glacier**

Altitude: 2450 mètres

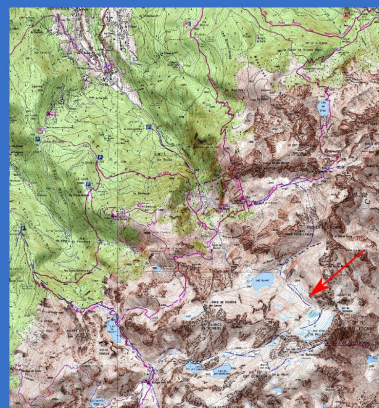
Position: X= 886 700m , Y= 2 026 100m

Installation: 10-09-2009

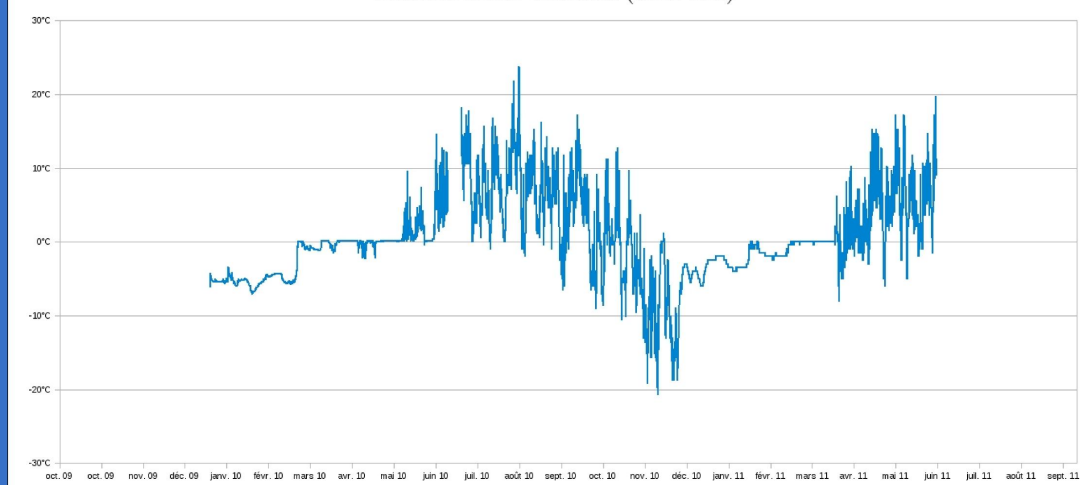
 Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au ...)

--> Données manquantes: du 06/07/10 au 16/07/10



TEMPÉRATURE GLACIER (IB22-Air)



Ibutton N°22:**Glacier****Lieu: Glacier**

Altitude: 2450 mètres

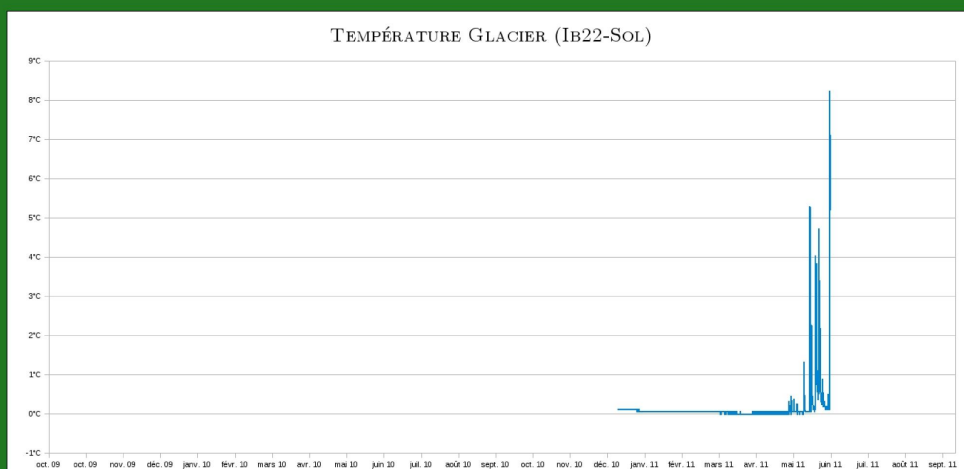
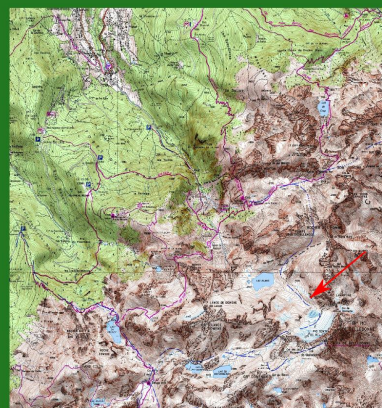
Position: X= 886 700m , Y= 2 026 100m

Installation: 10-09-2009

 Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C (du 10/09/09 au ...)

--> Données manquantes: Jusqu'au 02/01/11



CHAPITRE 14. LISTE DES SITES IBUTTONS :

Ibutton N°23: Sentier Supérieur**Lieu: Sentier Supérieur**

Altitude: 2150 mètres

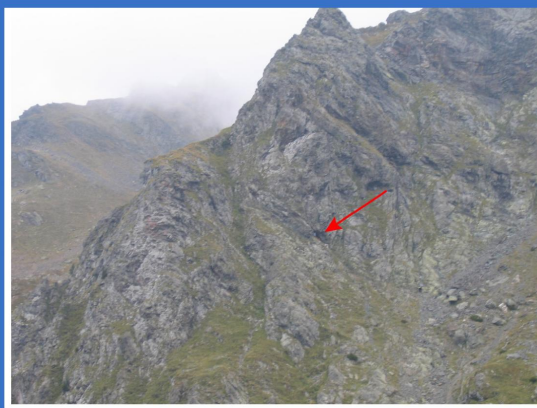
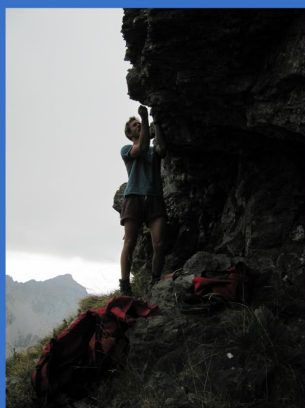
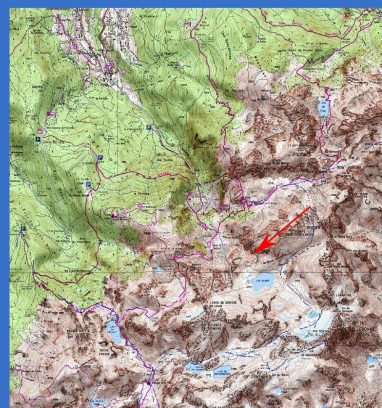
Position: X= 885 600m , Y= 2 026 910m

Installation: 10-09-2009

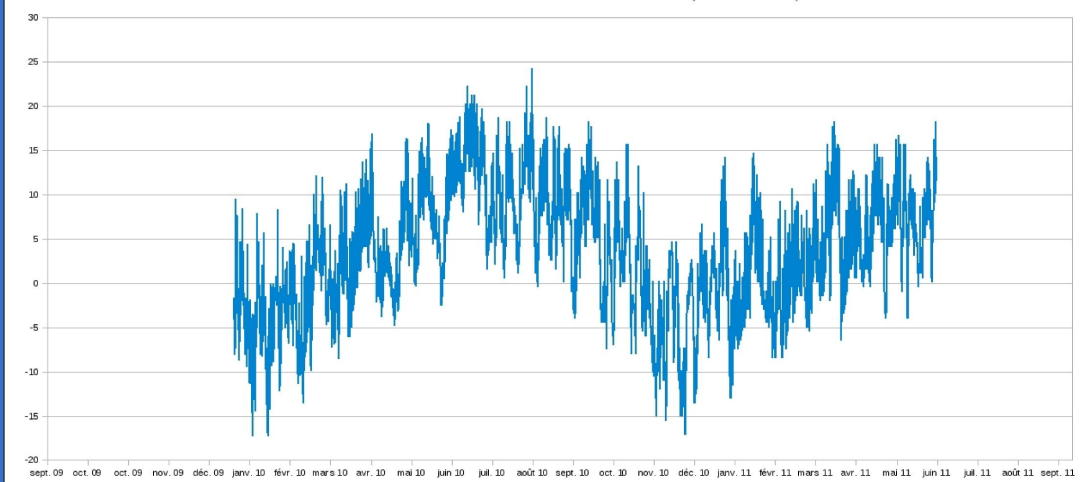
 Δt : 1h

Résolution: - 0,065°C

--> Données manquantes: __



TEMPÉRATURE SENITER SUPÉRIEUR (Ib23-Air)



Liste des Stations météorologiques :

1. Station du Pleynet (*1360 mètres*)
2. Station du Refuge Jean-Collet (*2060 mètres*)
3. Station du lac Blanc (*12230 mètres*)

Station N°1: Replat du Pleynet

Lieu: Replat du Pleynet

Altitude: 1375 mètres

Position: X= 884 440m , Y= 2 028 000m

Installation: 07-10-2009

Δt : 1h (températures) - Event (Pluies)

Résolution: - 1 Evènement = 0,199mm

--> Données manquantes: __

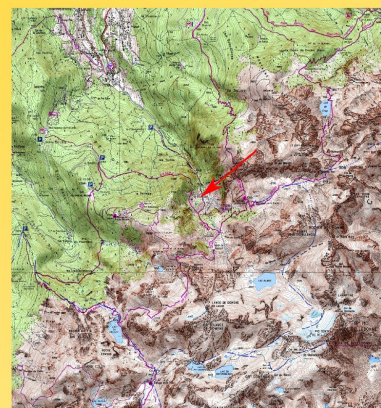
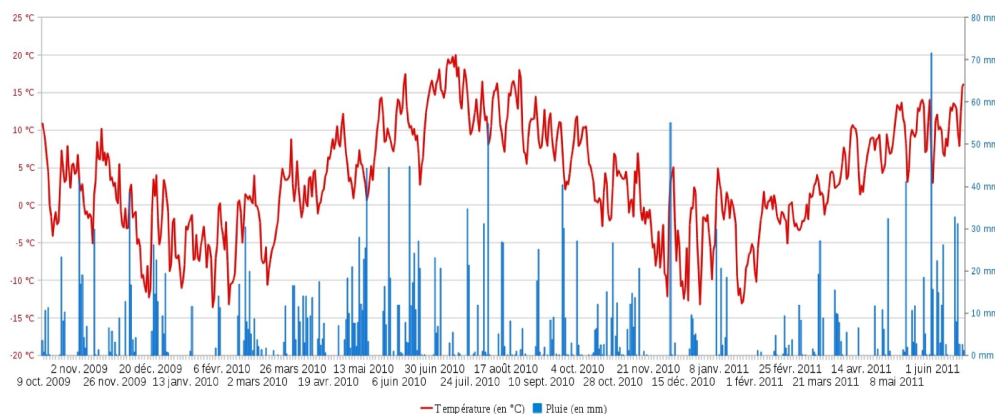


DIAGRAMME CLIMATIQUE DU PLEynet (1375 MÈTRES)
DU 8 OCTOBRE 2009 AU 22 JUIN 2011



CHAPITRE 14. LISTE DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES :

Station N°2: **Refuge Jean-collet****Lieu: Refuge Jean-Collet**

Altitude: 2020 mètres

Position: X= 885 500m , Y= 2 027 965m

Installation: 07-10-2009

 Δt : 1h (températures) - 15min (Pluies)

Résolution: - 1 Evènement = durée 15'

--> Données manquantes: __

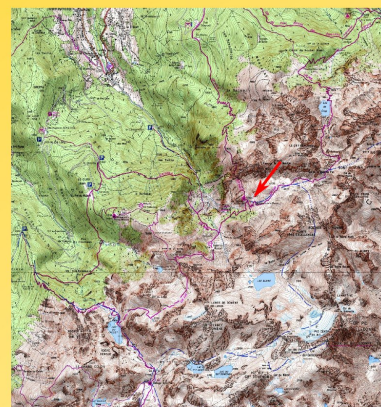
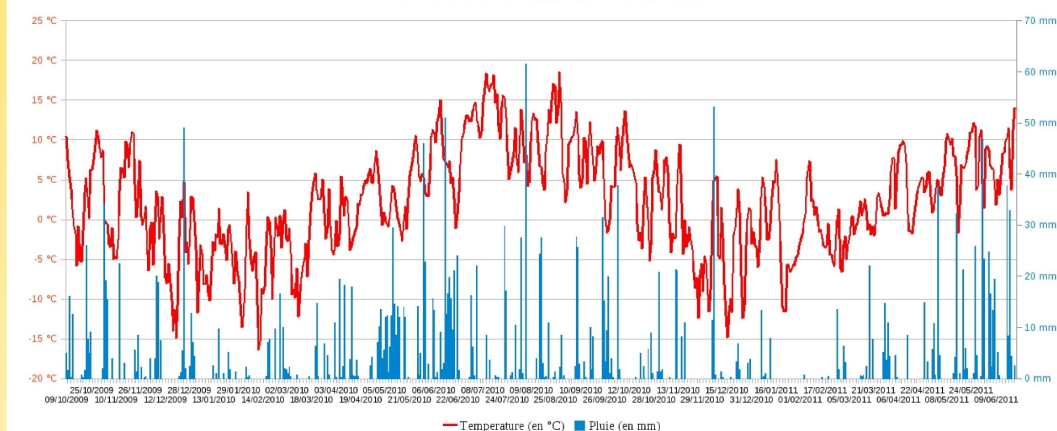


DIAGRAMME CLIMATIQUE DU REFUGE JEAN COLLET (2000 MÈTRES)
DU 8 OCTOBRE 2009 AU 22 JUIN 2011



Station N°3:

Lac Blanc

Lieu: Station du Lac Blanc

Altitude: 2230 mètres

Position: X= 886 100m , Y= 2 026 500m

Installation: 07-10-2009

 Δt : 1h (températures) - Pluies (Event)

Résolution: - 1 Evènement = 0,199mm

--> Données manquantes: __

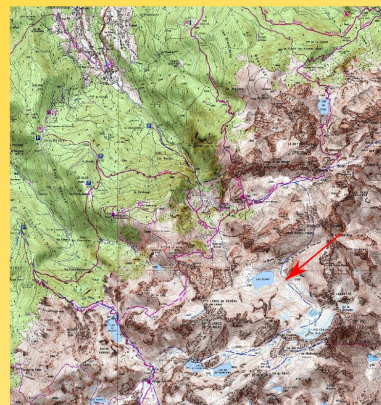
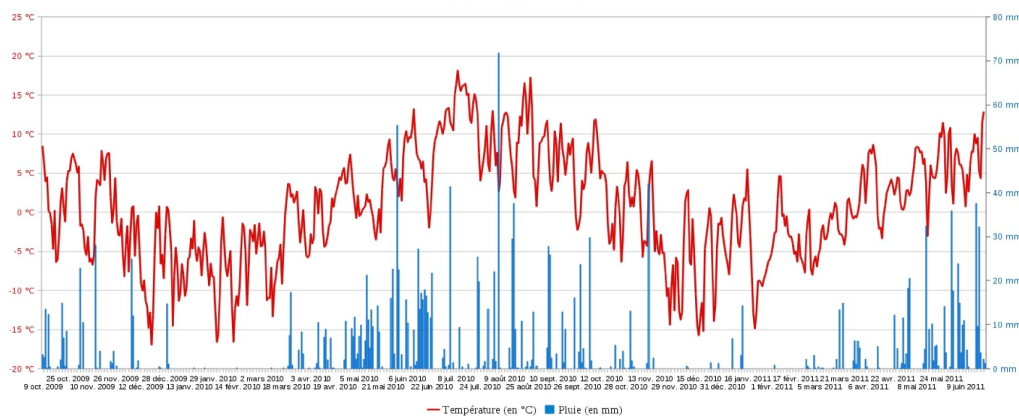


DIAGRAMME CLIMATIQUE DU LAC BLANC (2250 MÈTRES)
DU 8 OCTOBRE 2009 AU 22 JUIN 2011



Colloques et Publications :

1. Liste des publications et des Colloques
2. Poster EGU-Leonardo 2010 : Instrumentation
3. Poster EGU-General Assembly 2011 : Instrumentation
4. Poster EGU-General Assembly 2011 : SnoDEC

Liste des publications et des colloques

Publications Internationales avec comité de lecture :

- De Jong.C and Barth.T, 2008
Challenges in Hydrology of Mountain Ski Resorts und Changing Climate and Human Pressures
ESA Proceedings (Ed.), 2nd Space for Hydrology workshop, Water Storage and Runoff : Modeling, In-Situ data and Remote Sensing", Geneva
- De Jong. C., Masure.P, and Barth.T, 2008
Challenges of alpine catchment management under changing climatic and anthropogenic pressures
iEMSs 2008 : International Congress on Environmental Modelling and Software, Integrating, Sciences and Information Technology for Environmental Assessment and Decision

Publications :

- Saulnier.G-M and Barth.T, 2009
Perspectives pour l'observation hydrometeorologique des milieux de montagne, Collection EDYTEM, Cahier de géographie, 2009, 8, 147-156
- Parrainer une classe du secondaire, Présentation du monde de l'Université et de la Recherche aux lycéens, 2010
Barth.T ; Wilhelm.B ; Cros.E ; Fallourd.R ; Piot.C ; Spitz.C
CIES Grenoble (Centre d'Initiation à l'Enseignement Supérieur)

Conférence Internationales et nationales avec publication des actes :

- Barth.T ; Saulnier.G.M, Malet.E
Instrumentation hydro-météorologique d'un bassin versant de montagne
L'eau en montagne, mieux observer pour mieux prévoir – Publication SHF
Mars 2011, Lyon

Conférences internationales sans publication des actes :

- Barth.T ; Saulnier.G.M, Malet.E, 2011
Modelling the snow from high spatial and temporal temperatures and snow cover maps – (Oral)
Monitoring hydrometeorology in mountain catchment, the example of the Vorz (Belledonne, France) – (Poster)
An innovative sensor to cartography the Snow covering using simple terrestrial photography – (Poster)
EGU General Assembly 2011, April 2011, Vienna (Austria)
- Barth.T ; Saulnier.G.M, Malet.E, 2010
Snow covering detection using terrestrial photography in order to constraint snow and hydrological models – (Oral)
Hydro-Meteorological monitoring of a mountain catchment using numerous temperature sensor – (Poster)
EGU Leonardo Conference Series on the hydrological cycle, « Looking at Catchment in Colors », Nov 2010, Luxembourg
- Barth.T ; Saulnier.G.M, Malet.E, 2010
Hydro-meteorological monitoring of a mountain catchment, the example of the Vorz (Belledonne, France) – (Oral)
Snow cover detection using terrestrial photography, application to a mountain catchment in Alps region – (Oral)
EGU General Assembly 2010, May 2010 , Vienna (Austria)

Mémoires de Recherche :

CHAPITRE 14. COLLOQUES ET PUBLICATIONS :

- Mémoire de Master Recherche GIE (Géorisque et Information Environnementale)
T.Barth, Modélisation hydrologique des bassins versants de Montagne
Institut de la Montagne (Université de Savoie), Juin 2008
- Mémoire de Master Professionnel GAIA (Géorisques Appliquées à l'Ingénierie de l'Aménagement)
T.Barth, Étude du transfert d'eau de bassin versant à bassin versant dans le cadre d'installations d'enneigement de culture (application au versant des Arcs)
SMA (Société des Montagnes de l'Arcs, Bourg-Saint-Maurice, 73), Septembre 2007

Séminaires & Rencontres Scientifiques :

- Instrumentation et Modélisation des processus hydro-météorologiques des bassins versants de montagne
Prix : Meilleur Poster 2010
Journée des doctorants Université de Savoie, Novembre 2010
- Instrumentation et Modélisation hydro-météorologique des bassins versants de montagne, Application au bassin versant du Vorz (Belledonne, 38)
Journée des doctorants Laboratoire EDYTEM, Juin 2010
- Instrumentation d'un bassin versant de montagne, l'exemple du Vorz
Séminaire « Instrumentation en milieux difficiles », Mars 2010
- Instrumentation des bassins versant de montagne, Exemple du bassin versant du Vorz
Séminaire « Axe SNG », Decembre 2010
- Modélisation et Instrumentation des processus hydro-météorologiques, Application au bassin versant du Vorz
Journée des doctorants Laboratoire EDYTEM, Mars 2009

Hydro-Meteorological monitoring of a mountain catchment using numerous temperature sensor



Hydro-Meteorological monitoring of a mountain catchment using numerous temperature sensor

Thierry Barth, Georges-Marie Saulnier, Emmanuel Malet, Jean-Jacques Delannoy
Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, CNRS





INTRODUCTION

The 22 August 2005, an important flashflood occurs on the Vorz torrent (Belledune Range, Alps region, France). This event touch the village of Saint-Agnès located on the downstream of the main catchment of Vorz, and cause a lot of damages up to 7 millions euros, fortunately leaving no casualty.

After this event, civil authorities decided to fund a research program to better understand the hydrological cycle in the catchment and the mechanism of flashflood generation, especially in the context of climatic evolution, and modification of frequency and intensity of the flood events and meteorological extremes.

This research program includes several packages. The monitoring is the first one and is presented on this poster. The second step is the modelization and lead to implement hydrological model including meteorological and snow routines, based on the high-resolution data records on the catchment. However, relevant modeling can't be reached without a minimal amount data, which are always difficult to acquire in mountain areas. This particular problem and the issues find to solve him are mention in the following thematic boxes.



Totalizer: Total Annual Rainfall



Meteorology: Meteorological Stations



iButton: Temperature sensor Network



Camera: Snow cover detection



Hydrometry: Sensor HyMAGE-TIP



Temperature network management



Snow detection sensor principle



Temperature Maps: Example of a thermal inversion



Snow Cover Evolution: Snow cover map during the season 2009-2010



CONCLUSION

The high-resolution temperature network installed on the Vorz Catchment is operating since one season. The first results present in this poster show that it's possible to detect several typical meteorological phenomena, for example the thermal inversion, especially during winter. Moreover, we use all the data of the sensor network to generate temperature maps, and these maps can simulate these specific phenomena. Thus, in the future, we use these temperature maps with a hourly series to feed a meteorological model of the catchment and calculate the evolution of the capacity of snow accumulation and snow melting.

The second point developed in this paper is the use of the thermal photography to estimate some parameters like hydrometry or snow cover. These techniques are robust and allows to obtain a lot of spatial information for a short temporal period and for a minimum of cost. The creation of snow-cover maps for each day allows to better understand the evolution of snow cover on the surface of the catchment, and detect the accumulation areas or the preferential area of melting during the spring. Thus, the maps will be used to constrain the snow model developed on the catchment.

Finally, all the informations and data records in this high resolution spatial and temporal network, will be used to implement an hydrological model. The original method of this work, is that we have no complex traditional meteorological station, but we used numerous practical informations to estimate the evolution of the different meteorological parameters. The last step of this work will be to determine the most influential sensors of the network and the optimal location and number of these sensors.

Thierry Barth, Georges-Marie Saulnier, Emmanuel Malet, Jean-Jacques Delannoy
e-mail contact: thierry.barth@univ-savoie.fr

Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, CNRS
Bâtiment "Pôle Montagne" - Campus Scientifique du Bourget-du-Lac
73 370 Le Bourget-du-Lac Cedex - FRANCE
Tel: (00 33) + (0) 4 79 75 87 84 - Fax: (00 33) + (0) 4 79 75 81 71



FRANCE (Savoie, 73)
Chambery



Monitoring hydrometeorology in mountain catchment the example of the Vorz (Belledonne, France)



An innovative sensor to cartography the Snow covering using simple terrestrial photography



Thierry BARTH, PhD Student
e-mail: thierry.barth@univ-savoie.fr



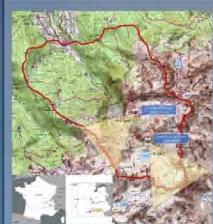
Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, CNRS
Bâtiment "Pôle Montagne" - Campus Scientifique du Bourgneuf-Lac
73 376 Le Bourgneuf-Lac-Croix - FRANCE
Tel: (00 33) + (0) 4 79 75 87 84 Fax: (00 33) + (0) 4 79 75 81 71

High spatial and temporal snow cover cartography using simple digital camera

Thierry Barth, Georges-Marie Saulnier, Emmanuel Malet
Laboratoire EDYTEM (CNRS, Université de Savoie)



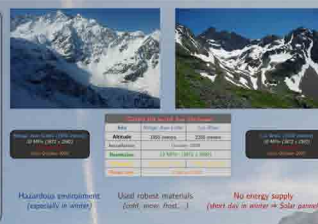
INTRODUCTION



Since several years, use of cameras for natural observations is increasing. Their progress in both storage capacity and robustness allow to get an incomparable qualitative recording of natural processes, even in hazardous environment such as mountainous regions. This poster focuses on the use of such cameras to monitor the snow cover in the high mountainous Vorz catchment (45 km², Belledonne Massif, France, elevations ranging from 970m to 2977m). We show that this approach may be a relevant complementary measurement with remote sensing or aerial snow cover photography. It allows indeed high temporal (5 to 7 pictures a day) and spatial (10 to 50 m²) resolutions at a minimal cost.

The first part of the technique is the monitoring on the catchment set up in autumn 2009, with the installation of two cameras. The second part is the automatic snow detection on the images acquired automatically by the cameras. These treatments were applied on more than 4000 pictures taken during the 2009-2010 winter season. As a third part, the automatic retro-mapping of the pictures onto the DTM is used. This step is needed to extract statistics on the snow cover temporal and spatial dynamics during the winter season and especially during the melting season.

Finally uncertainties and errors analysis are presented and discussed. It is then suggested that such monitoring approach may contribute to feed hydrological mountain models of medium catchment size (up to a few 100 km²) with high resolution snow cover data and thus to help to better constrain them.



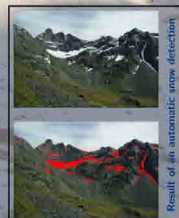
Automatic Snow Detection



Snow detection stage:
The first goal of the work is the image analysis for an automatic detection of snow covered catchment areas. This detection must be as precise as possible whatever the weather type or the season (winter/spring/summer).

- Manual creation of a snowy pixel library
- Sampling the natural variability: shadow, light brightness, illumination contrast, cloud cover,...
- Set of calibration: ~30 images

AUTOMATIC SNOW DETECTION



The only informations that we can use in this situation is the color code of each pixel in the image. Thus, we used the pixel library created previously and extract the color characteristics. According to the calibration data we classify the pixel in snow pixel class or no snow pixel class.

- Image segment for pixel RGB code determination
- Comparison between the pixel color code and the "snow RGB" library
- Classification of the pixel

Snow detection situation & performance

	Snow detection	No snow detection
Snow in reality	30.7%	11.8%
No snow in reality	14.7%	42.8%

Average Rate of success: 73.5%

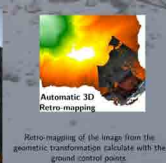
3D Transformation



3D Transformation:
The second step of the method is to perform the transformation of the 2D image into a 3D world. This transformation is achieved after a calibration stage for each site with a small software developed specifically.

- Calibration of the corresponding point between DTM and image
- Calculation of 3D geometrical transformations required for the image transformation
- Serial treatment of the set of images for each site

AUTOMATIC 3D TRANSFORMATION



Retro-mapping of the image from the geometric transformation calculated with the ground control points.

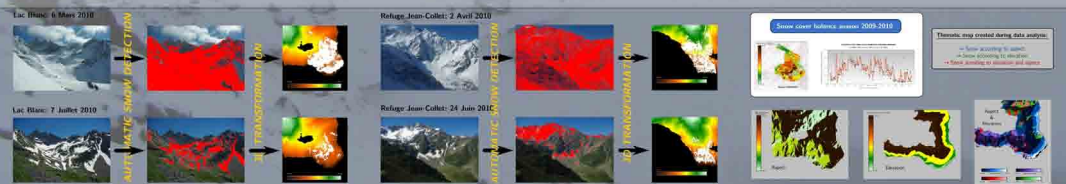
3D transformation accuracy & System accuracy

	Lac Blanc	Refuge Jean-Collet
Maximum distance	10m / 2km	50m / 1.75km
general accuracy	1%	5%

General system accuracy: ~ 1.5%

The goal of this sensor is to build a snow cover cartography and use these images to constrain a snow stock model and implement an hydrological model. I invite you to see my poster on this topic.
Session - H-2.12 : "Monitoring hydrometeorology in mountain catchment, the example of the Vorz (Belledonne, France)"
Hall A - A299 (Monday 4 Apr.)

RESULTS & CONCLUSION



The use of digital cameras to realize continuous observations on natural environment is now increasingly common, especially with its low cost and the exponential increase of storage capacity and camera resolution. However, the difficulty of the technique is performed the treatment of all the pictures automatically, with the great number of shooting per day. We have shown in this poster how we can implement this type of system, and detail the algorithm to achieve automatic detection of snow in picture, and the retro-mapping in a 3D environment. The development of this system required the implementation of new interfaces, to make picture treatment more easily accessible and to manage a database. This step have involved the development of a specific software calibration (3D, snow), completed by a serial treatment module allows to achieve most easily the treatment of thousand pictures on each site.

Analysis of different serial pictures that we collect on the different catchments will enable us to achieve the daily snow cover maps on each site. These snow cover maps allows to know as a very short timescale the presence of snow in many numerous points of the catchment and constrain effectively the snow stock model implements. This snow stock model will be feed with all the spatial data collect from the sensor network installed on the catchment. The aim of all these installations and methods will allow to performed the hydrological simulation based on TopMODEL and try to better understand the behaviour of the snow in the mountain hydrology.



Résumé:

Le 22 Août 2005 une crue intense s'est produite sur le bassin versant du Vorz, détruisant partiellement le hameau de la Gorge. Cet évènement a mis en évidence les difficultés à anticiper les conditions hydrométéorologiques en montagne où elles sont extrêmement variables spatialement et temporellement, et souvent faiblement instrumentées. De ce constat est né le projet de mettre en place un réseau d'instrumentation hydrométéorologique original sur le bassin versant du Vorz, afin d'y observer les phénomènes naturels et hydrologiques s'y produisant, de mieux les appréhender, et de construire les outils et méthodes nécessaires à leur modélisation.

Après deux saisons de mesures, les premiers résultats ont montré que le réseau mis en place permet d'obtenir des informations à haute résolution spatiale et temporelle sur les processus hydrométéorologiques. Malgré son installation dans le milieu difficile de la montagne (accessibilité, froid, énergie,...), une très bonne fiabilité a pu être mise en avant, ainsi que des perspectives de transposition à d'autres bassins versants, et ce, pour un faible coût financier. L'originalité du réseau est de réaliser un multi-échantillonnage de nombreux paramètres hydrométéorologiques (pluviométrie, température, neige, insolation,...), avec des résolutions spatiales (10 à 50 mètres) et temporelles (horaire à moins) permettant d'envisager une modélisation hydrologique à différentes échelles, aussi bien pour la gestion des ressources en eau (long terme) que pour la prévention des crues (court terme).

Les capteurs mis en place constituent un ensemble complémentaire et indissociable de divers instruments de mesure: iButtons (air et sol), totalisateurs, pluviomètres, appareils photographiques. La mise au point d'un capteur de mesure innovant de cartographie automatique de la couverture neigeuse (SnoDEC), à partir d'images photographiques classiques, prises à pas de temps régulier (5 à 7 images par jours) a été réalisée au cours de ce travail. Il permet de quantifier l'hétérogénéité spatiale et temporelle des phénomènes d'enneigement sur le versant, prépondérants sur son hydrologie, au vu de la persistance nivale (5 à 10 mois).

L'ensemble de ce dispositif permet de disposer d'une importante base de données, et de mettre en œuvre différentes techniques d'interpolations des variables hydrométéorologiques sur l'ensemble du bassin versant. Ainsi, des cartographies précises du champ de température et de pluviométrie seront disponibles au pas de temps journalier. En outre, le capteur SnoDEC permettra d'analyser et quantifier l'hétérogénéité spatio-temporelle (altitude, exposition, vitesse de fonte,...) de la couverture nivale.

A partir de ces données, on pourra mieux appréhender les mécanismes hydrologiques en jeu sur le site et dessiner les contours des modélisations futures. Dans le même temps, les données disponibles pourront être combinées afin de mettre en évidence des phénomènes difficilement mesurables (limite pluie/neige, inversion thermiques,...), qui serviront à l'avenir à contraindre de manière précise les modèles nivologiques et hydrologiques.

Au travers des différents paramètres instrumentés, et grâce à l'utilisation de l'imagerie, ce réseau est capable de mesurer des variables relevant de nombreux champs disciplinaires (dynamique glaciaire, cycle végétatif,...). Il s'inscrit ainsi, par son approche interdisciplinaire, dans une volonté de mise en place d'un réseau de mesure à coût limité, destiné à l'ensemble des acteurs de l'étude et la recherche des milieux de la montagne.

Mots-clés :

Hydrométéorologie, instrumentation, modélisation, neige, montagne, imagerie

Abstract:

In August 2005, a intense flashflood occurs on the Vorz catchment affecting the village of Saint-Agnès. This event highlighted the difficulties to forecast the hydrometeorological conditions in mountain areas where they are extremely variable spatially and temporally, and frequently poorly monitored. From this observation a project was funded to implement an original meteorological monitoring system on the catchment, in order to observe the natural and hydrologic phenomena to better understand them and to build methods and tools for their modeling.

After two years of monitoring, the first results showed that the network implement allows to obtain informations on hydrometeorological process at high spatial and temporal resolution. In spite of the installation in a harsh mountain environment (access, cold, energy,...) a very good reliability, and a lot of perspectives of transposition on other catchments have been point up for low investment costs. The originality of the network is to achieved a multi-sampling on a lot of hydrometeorological parameters (rain, temprature, snow, insulation,...), with spatial (10 to 50 meters) and temporal (hourly or less) resolution to performed a hydrological modeling at different scale both for the water ressource management (long term) or flashflood prevention (short term).

The Sensors use in the network constitute a complementary and indivisible set of monitoring system: iButton (air and soil temperature), rain gauge, totalizer, cameras. The development of an innovative sensor for automatic cartography of the snow cover (SnoDEC) from terrestriall photographs was achived during this work. This sensor allows to quantify spatial and temporal heterogeneity of snow cover evolution on the catchment, with images taken at regular time steps (5 to 7 frames per day). This heterogeneity is essential for understand and modelling the hydrology considering the strong snow persistence (5 to 10 months).

The dense network set up on the catchment enable us to collect a large database and implement different interpolation techniques on hydrometeorological process on the catchment. Thus, accurate maps of temperatures and rain are created with a daily or hourly timestep. Furthermore, the SnoDEC sensor will permit to analyse and quantify the spatial and temporal heterogeneity (elevation, aspect, velocity of melting,...) of the snow cover.

From the database, we will better understand the hydrological mechanisms occurring on the site, and we will build the first ideas and method for the future modelisation. In the same time, the available data will be combine in order to highlight phenomena very difficult to measure (rain/snow limit, thermal inversion,...) and that will be use in the future to constraint accurately the snow and hydrologic models.

Because of the different parameters monitored and the use of imagery, the network is able to measure variables from many field of study (glacier dynamic, vegetative cycle,...). Thereby, with its interdisciplinary approach the network think to implement a monitoring system at low cost in destination of the actors of study and research in mountain.

Key words:

Hydrometeorology, monitoring, modeling, snow, mountain, imaging